

Asfalttimassan ominaisuuksien parantaminen lentotuhkalla



Tielaitoksen
selvityksiä

69/1995

Helsinki 1995

Kehittämiskeskus

Tielaitos
TIEL/20
ASFALTTIMASSAN OMINAISUUKS
IEN PARANTAMINEN LENTOTUHK
28.12.1995 KK 331
Asian tun:239/94/20/TIEL
Ark=KK Säil=10 Tärk=
Liite 1/1

Tielaitoksen selvityksiä
69/1995

Risto Alkio, Jarmo Vuorinen

**Asfalttimassan ominaisuuksien
parantaminen lentotuhkalla**

Tielaitos
Kehittämiskeskus

Helsinki 1995

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-140-3
TIEL 3200345
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1995

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Aiheluokka

42

Asiasanat

lentotuhka, täytejauhe, tiivistettävyyys, vedenkestävyys

Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin lentotuhkien ominaisuuksia ja laadunvaihtelua sekä vaikutusta erikseen lisättävänä SMA- ja EA-päällysteen tiivistettävyyteen sekä vedenkestoon. Vertailutäytejauheena oli kalkkikivijauhe. Täytejauheen tarkoituksena on täyttää hienoainesvajausta ja /tai sillä voidaan parantaa päällysteen suhteitus- ja toiminnallisia ominaisuuksia.

Lentotuhkan käyttö asfalttipäällysteen täytejauheena edellyttää aina toiminnallista ennakkosuhteitusta ja lentotuhkan laadun säännöllistä seurantaa.

Lentotuhkalla oli kiviaineksen ja bitumisen sideaineen välistä tartuntaa parantava vaikutus. Vaikutuksen suuruus riippui lentotuhkan ominaisuuksista, joista tärkeimmät olivat vapaan kalkin määrä ja ominaispinta-ala.

Lentotuhkan ominaispinta-alalla ja rakeisuudella oli vaikutusta päällystemassan suhteitukseen ja toiminnallisiin ominaisuuksiin. Ne vaikuttivat optimisideainepitoisuuteen sekä herkkyyteen sideainepitoisuuden muutoksille. Hyvät ominaisuudet omaavalla lentotuhkalla voidaan päällystemassan optimisideainepitoisuutta pienentää verrattuna kalkkikivijauheella saatuun sideainepitoisuuteen.

Lentotuhkan laatu voi vaihdella erittäin paljon lyhyenkin ajan sisällä. Sen laatuominaisuuksiin vaikuttavat käytettävän kivihiilen lisäksi polttolaitos ja polttotekniikka. Voimaloissa mitattavan palamattoman hiilen määrä korreloi hyvin ominaispinta-alan kanssa.

Key words fly ash, fine aggregate, filler, asphalt, compactibility, water sensitivity

Abstract

The purpose of a filler in asphalt pavements is to fill the lack of fine-grained aggregate and to improve the proportioning and functional properties of asphalt mixtures. The use of fly ash in asphalt pavements always requires mix proportioning including the measure of volume and compaction properties of the mixture. Another requirement for the use of coal ash is a regular control of ash quality.

The aim of this research was to determine the effect of fly ash on the compactibility and water sensitivity of SMA 20 and GAC 20 asphalt pavements. Limestone filler was compared with three different kind of fly ashes. Another aim was to examine the variations of fly ash properties, regarding specific surface area, dry void content and grain size distribution. Sixteen different fly ashes from coal-fired power plants were included in this examination.

Fly ash improved the bonding between the binder and the aggregate. The intensity of this effect depended on the properties of a fly ash. Most important properties were the amount of free calcium and the specific surface area.

The proportioning and the functional properties of asphalt mixture were effected by the specific surface area and the grain size distribution of fly ash. These properties and their variations had a large effect on the optimum binder content. By using fly ash filler with good properties (for example low specific surface area) the optimum binder content can be lowered with respect to the limestone filler.

The quality of fly ash can vary a lot within a short time. The quality is effected by the composition of coal and the technique of a coal-fired power plant. There is a good correlation between the specific surface area and the carbon content (ignition loss) of a fly ash.

Alkusanat

Suomessa on tehty viime vuosina asfalttipäällystetutkimuksessa laajaa tutkimus- ja kehitystyötä, josta tärkein oli Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma (ASTO). Työn tuloksena on saatu runsaasti uutta tietoa, jota on voitu hyödyntää suunnitteluun, tuotantoon ja laadunohjaukseen liittyvissä ohjeissa sekä uusissa Asfalttinormeissa. Uusien normien tarkoituksena on antaa suunnittelijoille mahdollisuus valita useista vaihtoehtoisista materiaaleista ja ratkaisumalleista lopputuloksen kannalta toimivin ratkaisu. Toteutuksen kannalta on tunnettava asfalttipäällysteen komponenttien ominaisuudet ja niiden vaikutus massan ominaisuuksiin.

Tutkimus käsittelee lentotuhkan laatuominaisuuksia ja niiden vaikutusta asfalttipäällysteen toiminnallisiin ja vedenkesto-ominaisuuksiin. Tutkimuksen tilaajana oli tielaitoksen kehittämiskeskus. Tutkimusta valvoi tielaitoksen edustajana tieinsinööri Mats Reihe. Tutkimuksen vastuuhenkilönä Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen yhdyskuntatekniikan tie- ja geotekniikan tutkimusalueella oli erikoistutkija Risto Alkio. Raportin ovat laatineet erikoistutkija Risto Alkio ja tutkija Jarmo Vuorinen. Laboratoriotöistä on vastannut rakennusmestari Jorma Salonen.

Helsingissä marraskuussa 1995

Tielaitos
Kehittämiskeskus

Sisältö

1 JOHDANTO	9
2 LENTOTUHKANÄYTTEET	10
2.1 Eri voimaloiden näytteet	10
2.2 Yhden voimalan lentotuhkan laatuvaihtelu	10
3 LABORATORIOKOKKEET	11
3.1 Hienoaineskokeet	11
3.2 Tiivistettävyyys	12
3.3 Vedenkestokoe	13
4 KOKEIDEN TULOKSET	14
4.1 Lentotuhkien ominaisuudet	14
4.1.1 Eri voimaloiden lentotuhkat	14
4.1.2 Yhden voimalan lentotuhkan laatuvaihtelu	17
4.2 Tiivistettävyyys	19
4.3 Vedenkestokoe	23
5 TULOSTEN TARKASTELU	25
5.1 Lentotuhkien ominaisuudet	25
5.2 Tiivistettävyyys	33
5.3 Vedenkesto	42
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
7 LIITTEET	47

1 JOHDANTO

Asfalttipäällyste koostuu karkeasta, kulutusta kestävästä osasta ja hienoainesosasta. Hienoainesosalla on suuri vaikutus päällysteen toiminnallisiin ominaisuuksiin. Hienoaines voi olla kiviaineksen murskauksessa syntynyttä hienoaainesta tai erikseen lisättävää täytejauhetta. Täytejauheen tarkoituksena voi olla vain hienoainesvajeen täyttäminen tai sillä voidaan parantaa päällysteen suhteitus- ja toiminnallisia ominaisuuksia.

Kivihiltä poltettaessa syntyy sivutuotteena lentotuhkaa, jonka hyödyntäminen on kansantaloudellisesti järkevää. Lentotuhka on ominaisuuksiltaan potentiaalinen asfalttipäällysteen täytejauhemateriaali, mutta sen ominaisuudet saattavat vaihdella hyvinkin voimakkaasti. Ominaisuuksiin vaikuttavat poltettava hiili, polttolaitos ja polttotekniikka. Lentotuhkan on täytettävä täytejauheille asetetut vaatimukset ja/tai oltava toiminnallisilta ominaisuuksiltaan sovelias täytejauheeksi.

Onnistunut lopputulos edellyttää kaikkien asfalttipäällysteessä olevien komponenttien tuntemista ja hallintaa.

2 LENTOTUHKANÄYTTEET

2.1 Eri voimaloiden näytteet

Laboratoriotutkimuksiin valittiin 15 eri lentotuhkaa Etelä-Suomen hiilivoimalaitoksista. Lentotuhkanäytteet 1 - 11 on otettu maaliskuussa, näytteet 12 ja 13 huhtikuussa sekä näyte 14 toukokuussa 1994. Näyte 15 on otettu tammikuussa 1993. Kaikista lentotuhkista on määritetty taulukon 1 osoittamat perusominaisuudet ja rakeisuuskäyrä (kuvat 2 - 4) sekä yhtä tuhkaa (näyte 15) lukuun ottamatta kemiallinen koostumus (liite 1). Määritykset on tehty alle 0,075 mm aineksesta. Ainoat poikkeavuudet viimeksi mainittuun ovat alkuperäisestä näytteestä tehty hehkutushäviön määrittäminen ja < 0,075 mm:n aineksen läpäisyarvo. Jokaisen lentotuhkan määritykset on tehty vain yhdestä, satunnaisesti otetusta tuhkaerästä, joten näiden laboratoriotutkimusten perusteella ei voida arvioida jonkun tietyn voimalaitoksen lentotuhkan keskimääräistä laatua tai laatuvariaatiota ajan funktiona.

2.2 Yhden voimalan lentotuhkan laatuvariaatio

Tutkimuksessa tarkasteltiin kohdan 2.1 tuhkien lisäksi yhden voimalaitoksen lentotuhkan laatuvariaatiota. Kyseistä lentotuhkaa käytettiin Uudenmaan tiepiirissä asfalttipäällystystöissä täytejauheena. Käytettävissä olevia valvontatuloksia oli 41 kpl. Näytteet on otettu ajanjaksoina 4.3. - 20.6. ja 6.9. - 21.11. 1994. Näytteistä on määritetty kiintotiheys, ominaispinta-ala, tyhjätila ja palamattoman hiilen määrä.

3 LABORATORIOKOKKEET

3.1 Hienoaineskokeet

Tuhkanäytteistä määritettiin Asfalttinormien 1994 mukaiset ominaisuudet, joita ovat rakeisuus, tyhjätila ja ominaispinta-ala sekä lisäksi kiintotiheys, vedenadsorptio, veden adsorptiokyky, hehkutushäviö, vapaan kalkin määrä ja kemiallinen analyysi.

Kiintotiheys on määritetty kahdella rinnakkaisnäytteellä menetelmän TIE 235 mukaisesti. Tätä pyknometrimenetelmällä saatua kiintotiheyttä on käytetty määrittäessä ominaispinta-alaa ja tyhjätilaa.

Ominaispinta-alalla tarkoitetaan näytteen rakeiden yhteenlaskettua pinta-alaa massayksikköä kohti. Ominaispinta-ala on määritetty Nova 1000-laitteella typpiadsorptiomenetelmällä (TIE 215, 3-piste BET). Jokaisesta lentotuhkasta on tehty yksi ominaispinta-alamääritys. Menetelmässä kuivattuun näytteeseen adsorboidaan nestemäisen typen lämpötilassa ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) typpikaasua. Adsorboituneen typen määrän avulla lasketaan näytteen pinta-ala olettamalla, että näytteen pinnalla on yhden molekyylin vahvuinen typpikerros. Asfalttipäällysteessä hienoaineksen ominaispinta-alalla on vaikutusta mm. sideainepitoisuuteen, tiivistettävyyteen ja rakeiden sitoman veden määrään. Asfalttinormien mukaan hienoainesseoksen ominaispinta-alan tulee olla välillä $1000 - 5000\text{ m}^2/\text{kg}$.

Hienoaineksen vedenadsorptiolla tarkoitetaan sen 100 %:n suhteellisessa kosteudessa sitomaa veden määrää. Kokeessa avoimessa astiassa olevaa, kuivapainoltaan tunnettua näytettä (2 rinnakkaisnäytettä) säilytetään 7 vrk:n ajan suljetussa eksikaattorissa, jossa on 100 % suhteellinen kosteus (TIE 214). Vedenadsorptioluku on näytteeseen adsorboituneen veden määrä prosentteina näytteen kuivapainosta. Hienoaineksen vedenadsorptiolla on merkitystä rakeiden sitoman veden määrään ja sitä kautta massan vedenkestävyyteen.

Kiviaineksen ja bitumin välisiä tartuntaominaisuuksia kuvaava veden adsorptiokyky neliometriä kohti määritetään jakamalla vedenadsorptio (mg/g) ominaispinta-alalla (m^2/g). Asfalttinormien mukaan tämän arvon tulisi olla $\leq 10\text{ mg/m}^2$.

Hienoaineksen tyhjätila ilmoittaa tilavuusprosentteina näytteen sisältämien huokosten määrän standardikokeessa (TIE 216). Tyhjätila määritetään vähintään kolmella rinnakkaisnäytteellä ns. Rigden-laitteella. Laitteen sylinteriin sijoitettu noin 10 g kuiva näyte tiivistetään vapaasti putoavan sylinterikappaleen ja männän avulla. Sadan pudotuskerran jälkeen mitataan tiivistetyn materiaalin korkeus. Materiaalin tilavuuden, massan ja kiintotiheyden avulla lasketaan näytteen tyhjätila. Hienoaineksen tyhjätila on tärkeä suhteitusominaisuus ja Asfalttinormien mukaan sen tulisi olla 36 - 44 %.

Hienoaineksen hehkutushäviö on määritetty muhveliuunissa polttamalla menetelmän EN 196-2 periaatteen mukaisesti, jossa hehkutuslämpötila on 975 °C. Hehkutushäviö on määritetty sekä alkuperäisestä seulomattomasta aineksesta että seulotusta < 0,075 mm aineksesta kahdella rinnakkaisnäytteellä. Voimalaitos, jonka lentotuhkan laatuvaihtelua seurattiin, on määrittänyt omista tuhkistaan palamattoman hiilen määrän Leco-analysaattorilla (induktiouuni).

Alle 0,075 mm:n läpäisyprosentti on saatu kuivaseulomalla noin 300 g alkuperäistä lentotuhkanäytettä. Rakeisuuskäyrät on määritetty areometrillä menetelmän TIE 203 mukaisesti. Koska jokaisesta tuhkasta on tehty vain yksi rakeisuusmäärittäminen, ovat käyrät vain suuntaa-antavia. Asfalttinormien mukaan hienoaines saa sisältää enintään 10 % < 0,002 mm ainesta.

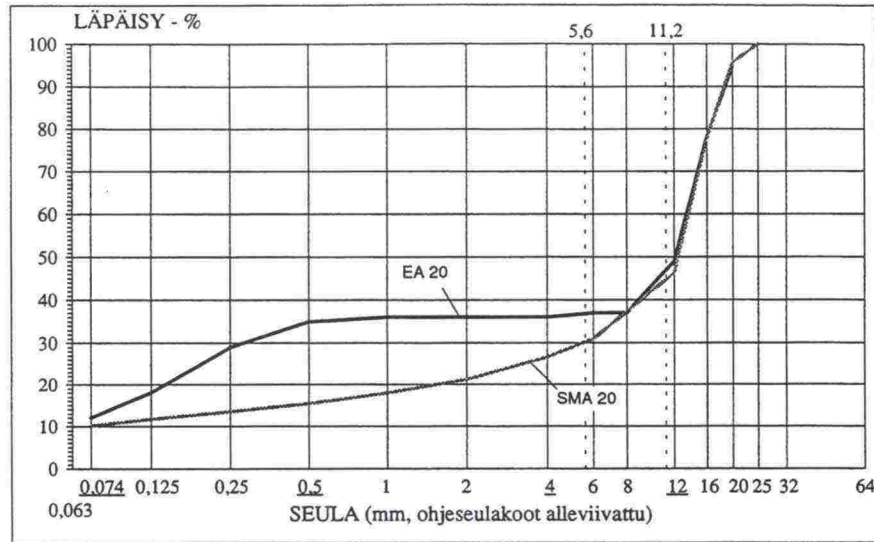
Vapaan kalkin (CaO) määrä on määritetty standardin ASTM C 114 mukaan VTT:n Kemiantekniikan tutkimusyksikössä.

Lentotuhkien kemiallinen analyysi on tehty Rautaruukki Oy:n Raahen tutkimuskeskuksessa Philips PW 1400-röntgenspektrometrillä.

3.2 Tiivistettävyyys

Koemassoiksi valittiin SMA 20 ja EA 20-massat. Molemmista tehtiin tiivistettävyysskoheet ja massalla EA 20 lisäksi vedenkestokokeet. Kiviaineksena oli Teiskon granodioriitti ja sideaineena bitumi B-80. Lisäaineena SMA 20 massassa oli sellukuitu (Arbocel), jota käytettiin 0,4 %. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 1. Hienoaineksiksi valittiin erilaisten ominaisuuksien perusteella kolme lentotuhkaa vedenkesto- ja tiivistettävyysskokeisiin. Vertailuhienoaineksena oli kalkkikivijauhe.

Lentotuhkan vaikutus massojen suhteitukseen ja tiivistettävyyteen testattiin ICT-kierrotiivistimellä, jossa sylinterissä olevaa massaa tiivistetään pyörivässä liikkeessä olevan männän avulla (TIE 433). Kokeen tulos ilmoitetaan leikkausjännityksenä kN/m², joka kuvaa massan muodonmuutoksen vastustuskykyä tiivistyskokeessa. Leikkausjännitykset määritetään normaalisti 102 ja 406 kierroksen jälkeen. Jokaisella massalla tiivistyskoe tehtiin vähintään kolmella eri sideainepitoisuudella. Lähtösideainepitoisuudet valittiin aikaisempien suhteitusten ja kokeiden perusteella. Näytteistä määritettiin massan tiheys, koekappaleen tiheys, tyhjätila, kiviaineksen tyhjätila ja sideaineen täyttöaste. Tiivistettävyysskoekiden tulosten perusteella valittiin koekappaleet vedenkestokokeisiin.



Kuva 1. Kokeissa käytetyt kiviaineksen rakeisuuskäyrät.

3.3 Vedenkestokoe

Bitumisen sideaineen ja kiviaineksen väliseen tartuntaan vaikuttaa epäpuhtauden lisäksi voimakkaasti kiviaineksen fysikaalis-kemiallinen luonne. Karkean kiviaineksen ja hienoaineksen mineraalikoostumuksella sekä hienoaineksen kemiallisella koostumuksella on ratkaiseva vaikutus tartuntaan. Varsinkin runsaasti kalimaasälpää sisältävillä kiviaineksilla on luonnostaan huono tartunta sideaineen kanssa ja siten myös huono vedenkestävyys.

Hienoainesten vaikutusta asfalttimassojen vedenkestävyyteen tutkittiin halkaisuvetokokeen (TIE 407) avulla. Päälystemassatyyppiä valittiin epäjatkuva asfaltti (EA 20), jossa hienoainespitoisuus on suuri. Karkeaksi kiviainekseksi valittiin ASTO-projektin referenssikiviaines, Teiskon granodioriitti, jolla on todettu olevan huonot tartuntaominaisuudet. Erikseen lisättävää hienoainesta käytettiin 12 %. Hienoaineksiksi valittiin ominaisuuksiltaan kolme erilaista lentotuhkaa (100 %) sekä lentotuhkan ja kalimaasälvän seos (50 %/50 %). Lentotuhkilla muuttujina olivat ominaispinta-ala ja vapaan kalkin määrä. Vertailuhienoaineksena oli kalkkikivijauheen ja kalimaasälvän seos (50 %/50 %).

Massoista valmistetuista laatoista porattiin halkaisijaltaan 100 mm koekappaleet. Kokeen koekappaleista toista osaa säilytettiin vesisäilytyksessä ja toista osaa ilmasäilytyksessä kuusi kuukautta. Säilytyslämpötilana oli huoneilman lämpötila. Säilytyksen jälkeen koekappaleet temperoitiin +10 °C lämpötilaan ja tehtiin halkaisuvetokoe. Kokeella määritettiin halkaisuvetolujuus eli lieriömäisen koekappaleen sivusuuntaisessa puristuskokeessa saadusta murtokuormituksesta (N) laskettu vetolujuus (kN/m²). Ns. tarttuvuusluku lasketaan vesikäsiteltyjen ja kuivien koekappaleiden halkaisuvetolujuuden välisenä suhteena.

4 KOKEIDEN TULOKSET

4.1 Lentotuhkien ominaisuudet

4.1.1 Eri voimaloiden lentotuhkat

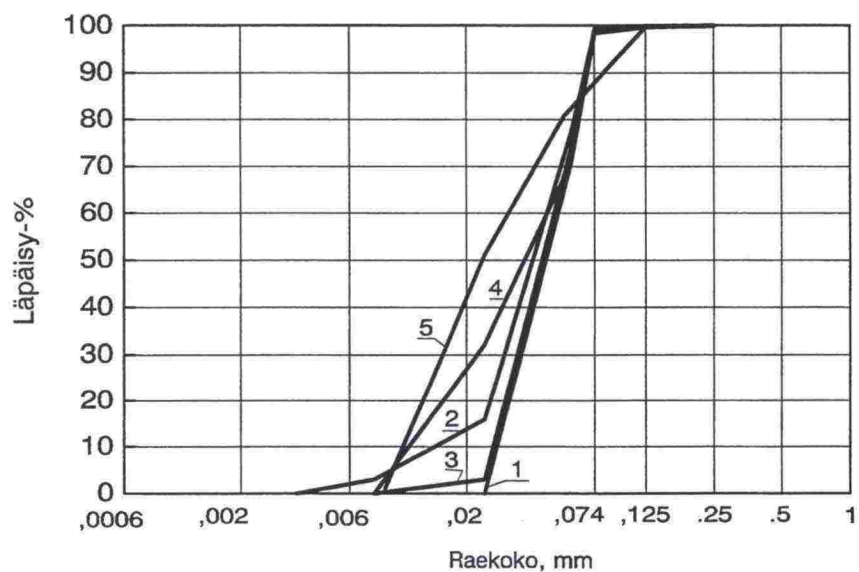
Lentotuhkien laboratoriotulokset esitetään perusominaisuuksien osalta taulukossa 1. Rakeisuuskäyrät ovat kuvissa 2 - 4 ja kemiallinen koostumus liitteessä 1.

Taulukko 1. Lentotuhkanäytteiden perusominaisuudet.

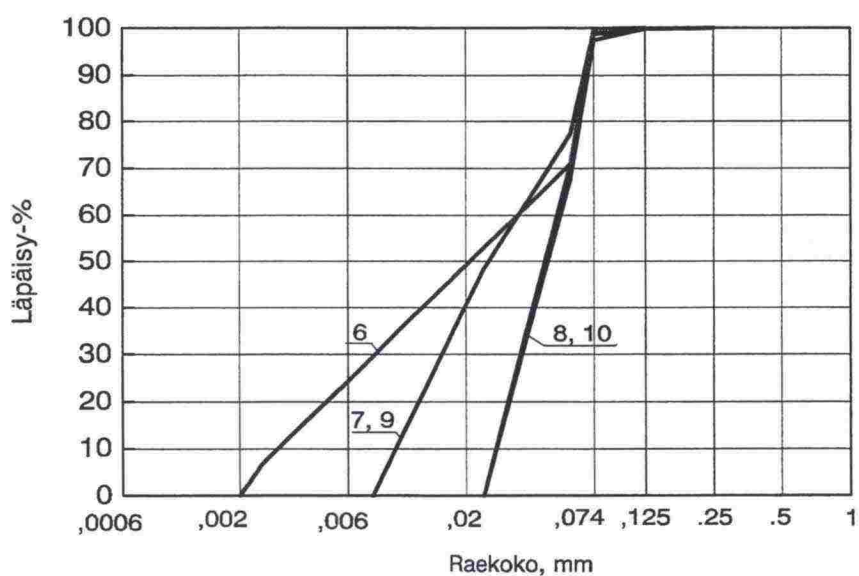
NÄYTE NRO	KIINTO TIHEYS g/cm ³	OMIN. PINTA ALA m ² /g	VEDEN ADS. %	VEDEN ADS. mg/m ²	TYHJÄ TILA %	HEHK. HÄVIÖ <0,075 %	HEHK. HÄVIÖ ALKUP. %	<0,075 MM:N LÄP. %	VAPAA KALKKI CaO %
1	2,29	1,78	1,96	11,0	36,8	4,5	5,3	83,2	0,25
2	2,30	3,04	2,13	7,0	40,8	7,9	11,8	67,1	0,14
3	2,27	5,13	3,01	5,9	40,1	9,0	14,0	75,8	0,48
4	2,19	7,46	1,92	2,6	42,6	11,7	13,9	81,4	0,29
5	2,26	3,80	0,91	2,4	42,8	5,6	6,3	81,0	0,76
6	2,24	1,39	0,46	3,3	34,5	1,6	2,3	83,8	0,08
7	2,11	17,3	3,02	1,7	57,3	23,3	34,4	57,2	0,65
8	2,28	1,51	1,89	12,5	37,2	2,6	3,2	80,3	0,04*
9	2,26	8,93	2,60	2,9	50,1	10,9	13,3	88,1	0,40
10	2,27	1,43	2,35	16,4	31,7	1,6	2,5	89,7	0,13
11	2,34	1,88	1,32	7,0	31,2	2,6	4,1	77,3	0,30
12	2,26	2,66	2,03	7,6	38,5	1,8	2,1	88,1	0,04*
13	2,40	2,22	1,06	4,8	36,7	3,0	4,6	83,8	0,48
14	2,48	1,40	2,44	17,4	35,3	1,6	2,7	89,4	0,30
15	2,40	0,97	2,28	23,5	35,5	1,7	2,4	89,3	0,29
KA	2,29	4,06	1,96	8,4	39,4	5,9	8,2	81,0	0,31

* = alle 0,05 (arvoa 0,04 käytetty keskiarvon laskemisessa)

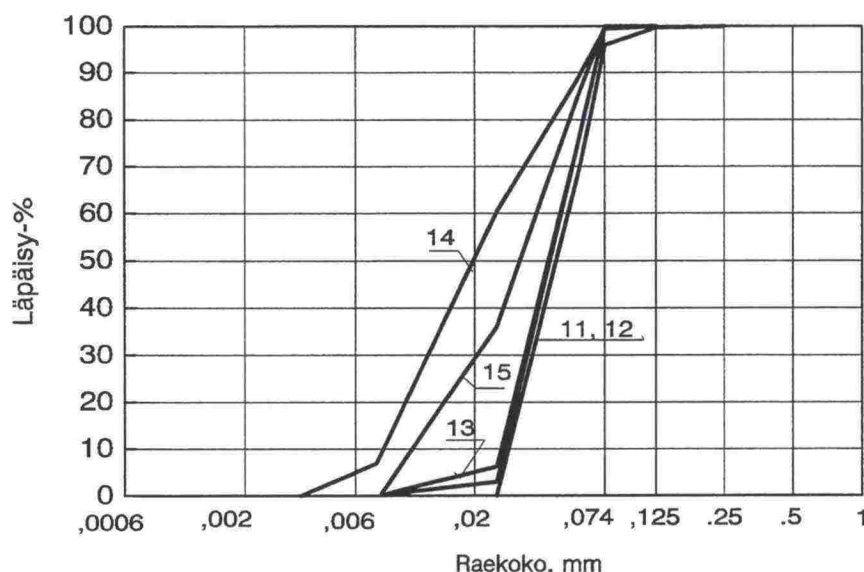
Lentotuhkien kiintotiheydet vaihtelivat välillä 2,11 - 2,48 g/cm³ keskiarvon ollessa 2,29 g/cm³. Ominaispinta-alat olivat välillä 0,97-17,3 m²/g ja keskiarvo oli 4,06 m²/g. Neljän tuhkan ominaispinta-alat olivat korkeampia kuin Asfalttinormien hienoainesseokselle asetettu vaatimus 5 m²/g. Vain yhden tuhkan arvo oli yli 10 m²/g.



Kuva 2. Lentotuhkien 1 - 5 rakeisuuskäyrät.



Kuva 3. Lentotuhkien 6 - 10 rakeisuuskäyrät.



Kuva 4. Lentotuhkien 11 - 15 rakeisuuskäyrät.

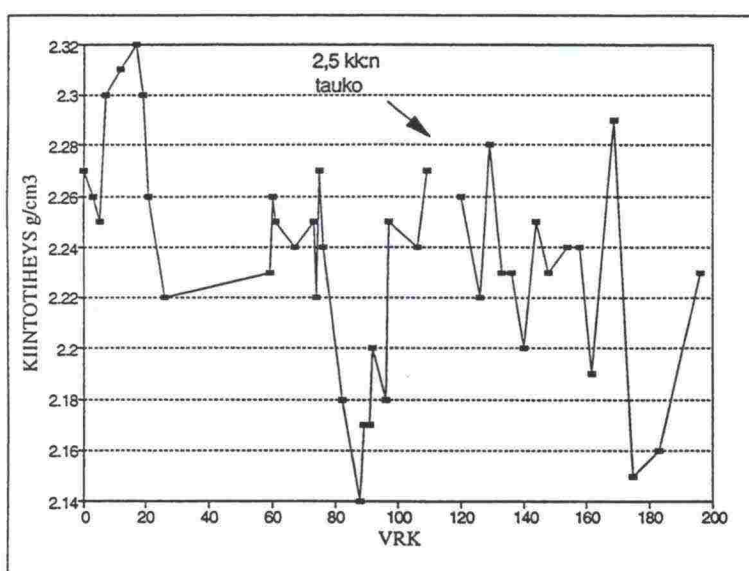
Vedenadsorptio oli keskimäärin 1,96 % arvojen vaihdellessa välillä 0,46 - 3,02 %. Todella suuria arvoja ei esiintynyt. Vedenadsorptiokyky neliometriä kohti oli keskimäärin 8,4 mg/m² vaihteluvälin ollessa 1,7 - 23,5 mg/m². Viiden tuhkan arvo oli korkeampi kuin normien suosittama 10 mg/m². Tyhjätiloja tarkastelemalla havaitaan, että viiden tuhkan arvot olivat alhaisempia ja kahden tuhkan arvot korkeampia kuin Asfalttinormien hienoainesseokselle vaatimat arvot 36 - 44 %. Tyhjätilojen vaihteluväli oli 31,2 - 57,3 % ja keskiarvo 39,4 %.

Alkuperäisestä näytteestä määritetty hehkutushäviö vaihteli välillä 2,1 - 34,4 % ja < 0,074 mm:n aineksesta määritetty hehkutushäviö välillä 1,6 - 23,3 %. Keskiarvot ovat vastaavasti 8,2 % ja 5,9 %. Yli 10 % hehkutushäviöitä saatiin viidellä alkuperäisnäytteellä ja kolmella < 0,075 mm:n näytteellä. Lentotuhkien < 0,075 mm:n läpäisyarvot olivat keskimäärin 81,0 % arvojen vaihdellessa välillä 57,2 - 89,7 %. Alle 0,075 mm:n aineksesta areometrikokeella määritettyjen rakeisuuskäyrien (kuvat 2 - 4) perusteella lentotuhkat eivät sisältäneet < 0,002 mm:n ainesta (Asfalttinormien vaatimuksena ≤ 10 % < 0,002 mm:n ainesta).

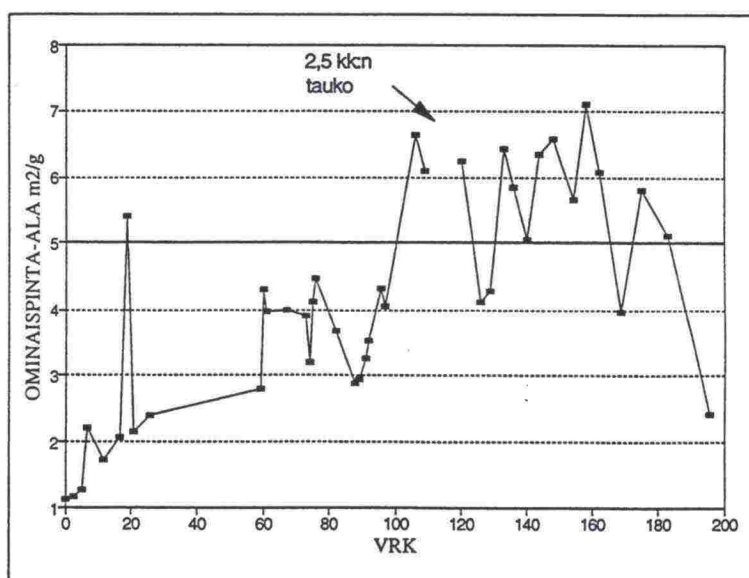
Vapaan kalkin (CaO) määrä vaihteli alle 0,05:n arvoista 0,76:en keskiarvon ollessa 0,31. Muut kemiallisen analyysin tulokset on esitetty liitteessä 1. Näistä mainittakoon piidioksidin (SiO₂) ja hiilen (C) pitoisuudet, jotka vaihtelivat välillä 38,9 - 61,2 % (SiO₂, keskiarvo 50,6 %) ja 1,43 - 22,10 % (C, keskiarvo 5,84 %). Hiilipitoisuudet olivat luonnollisesti samaa luokkaa kuin < 0,075 mm:n aineksesta määritetyt hehkutushäviöt.

4.1.2 Yhden voimalan lentotuhkan laatu vaihtelu

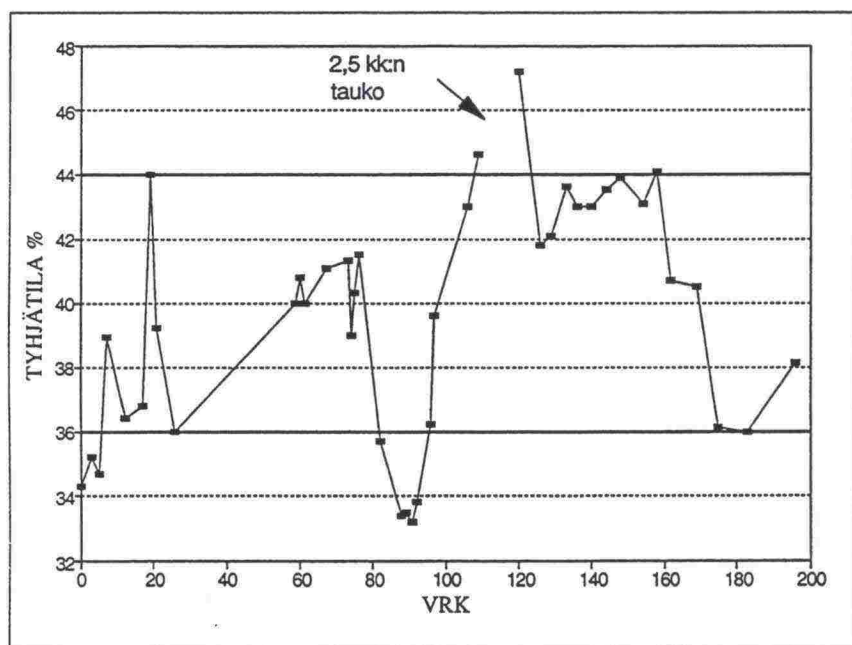
Yhden kivihiilivoimalan lentotuhkan laatu vaihtelut ajan funktiona esitetään kuvissa 5 - 8. Tuhkan kiintotiheys vaihteli kappaleessa 2.2 mainittuna ajanjaksona välillä 2,14 - 2,32 g/cm³ keskiarvon ollessa 2,24 g/cm³. Ominaispinta-alamääritysten, joita oli 41 kpl, keskiarvo oli 4,11 m²/g ja vaihteluväli 1,12 - 7,10 m²/g. Tyhjätilan vastaavat arvot olivat 39,5 % ja 33,2 - 47,2 %. Voimalaitoksen määrittämät palamattoman hiilen määrät vaihtelivat välillä 1,6 - 8,5 % keskiarvon ollessa 5,1 %.



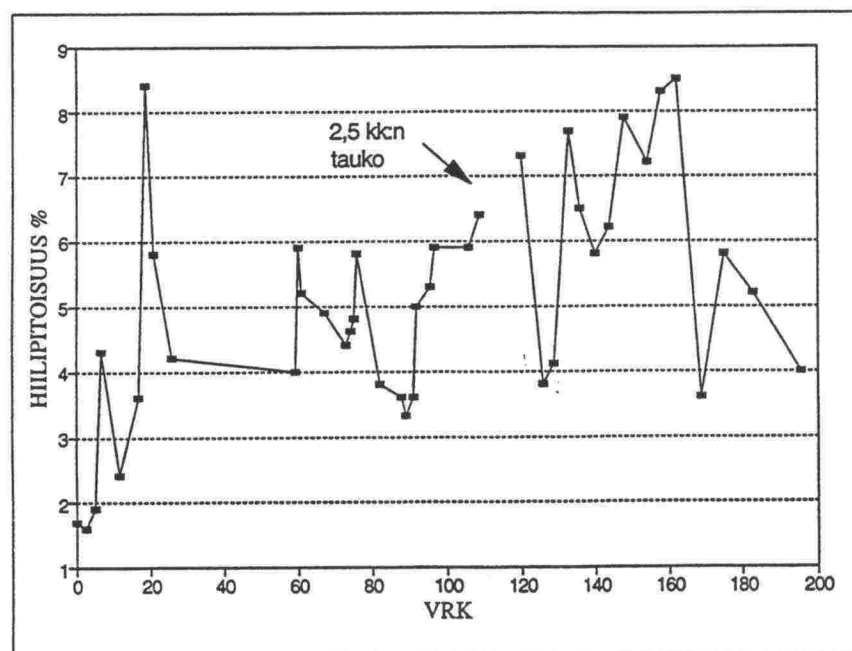
Kuva 5. Yhden voimalaitoksen lentotuhkan kiintotiheyden vaihtelut.



Kuva 6. Yhden voimalaitoksen lentotuhkan ominaispinta-alan vaihtelut.



Kuva 7. Yhden voimalaitoksen lentotuhkan tyhjätilan vaihtelut.



Kuva 8. Yhden lentotuhkan palamattoman hiilen määrän vaihtelut.

4.2 Tiivistettävyyys

Tiivistettävyy- ja vedenkestokokeisiin valittiin laboratoriokokeiden perusteella kolme eri lentotuhkaa ja vertailuhienoainekseksi kalkkikivijauhe. Valintaperusteina lentotuhkilla olivat suhteituksen ja tiivistettävyyden osalta erilaiset ominaispinta-alat sekä vedenkestävyyden osalta erilainen vapaan kalkin määrä. Lentotuhkista valittiin kokeisiin lentotuhkat 8, 9 ja 14. Näillä tehtiin EA 20-massan tiivistettävyy- ja vedenkestokokeet sekä SMA-massan tiivistettävyysskokeet. EA-massan tiivistettävyysskokeissa käytettiin aluksi suuren ominaispinta-alan omaavaa lentotuhkaa 4, mutta tuhka vaihdettiin sen vaatiman erittäin suuren sideainepitoisuuden vuoksi lentotuhkaan 9, jolla on myös suuri ominaispinta-ala. Lentotuhkien ja kalkkikivijauheen valintaominaisuudet on esitetty taulukossa 2. Taulukossa on myös vedenkestokokeissa hienoaineksena käytetyn kalimaasälvän vastaavat ominaisuudet.

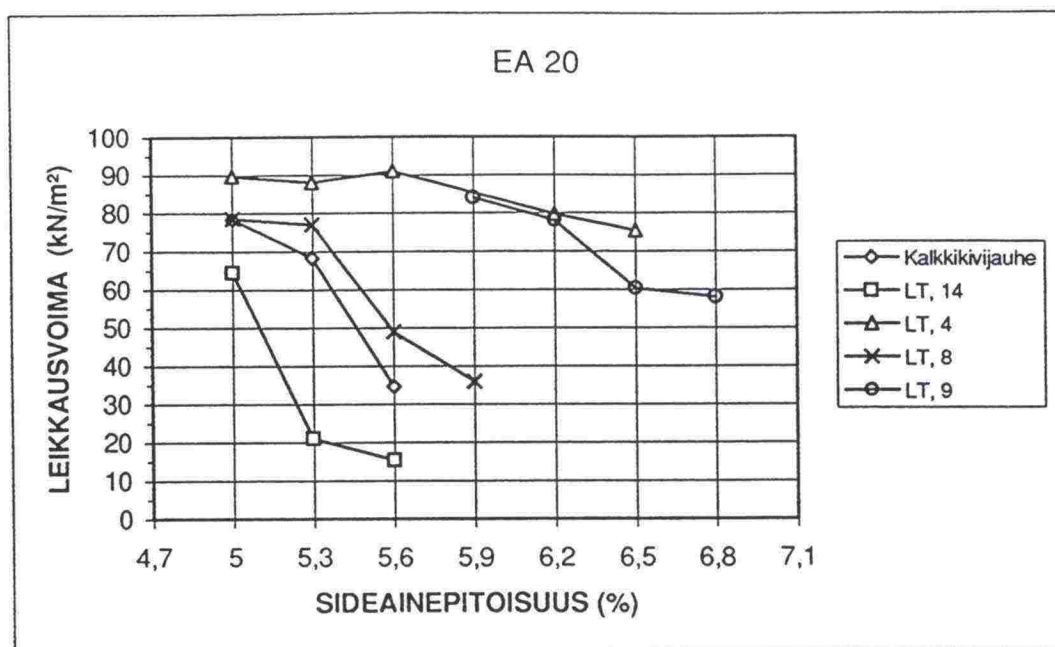
Taulukko 2. Tiivistettävyy- ja vedenkestokokeissa käytettyjen hienoainesten ominaisuudet.

Ominaisuus	Lentotuhka				Kalkkikivi	Kalimaasälpä
	14	9	8	4		
Ominaispinta-ala m ² /g	1,40	8,93	1,51	7,46	1,05	1,85
Vapaa kalkki CaO %	0,30	0,40	< 0,05	0,29	-	-
Tyhjätila %	35,3	50,1	37,2	42,6	31,7	42,2

Tiivistettävyyys testattiin ICT-kierrotiivistimellä. Leikkausjännitykset määritettiin 102 ja 406 kierroksen tiivistystyön jälkeen. Kuvissa 9 - 11 on esitetty keskiarvoina leikkausjännitykset eri hienoaineksilla ja eri massoilla. Liitteessä 2 tulokset on esitetty myös yksittäistuloksina eri sideainepitoisuuksilla ja massoilla. Tiivistetyistä koekappaleista määritettiin tiheydet teoreettisesti ja kokeellisesti vesi-ilmapunnituksin. Laskennallisesti näytteistä määritettiin täyttöaste, tyhjätila ja kiviaineksen tyhjätila. Tulokset on esitetty liitteissä 3 - 4 sekä lukuarvoina että kuvina, joista selviää keskiarvokäyrän lisäksi myös kolmen rinnakkaisnäytteen yksittäistulokset.

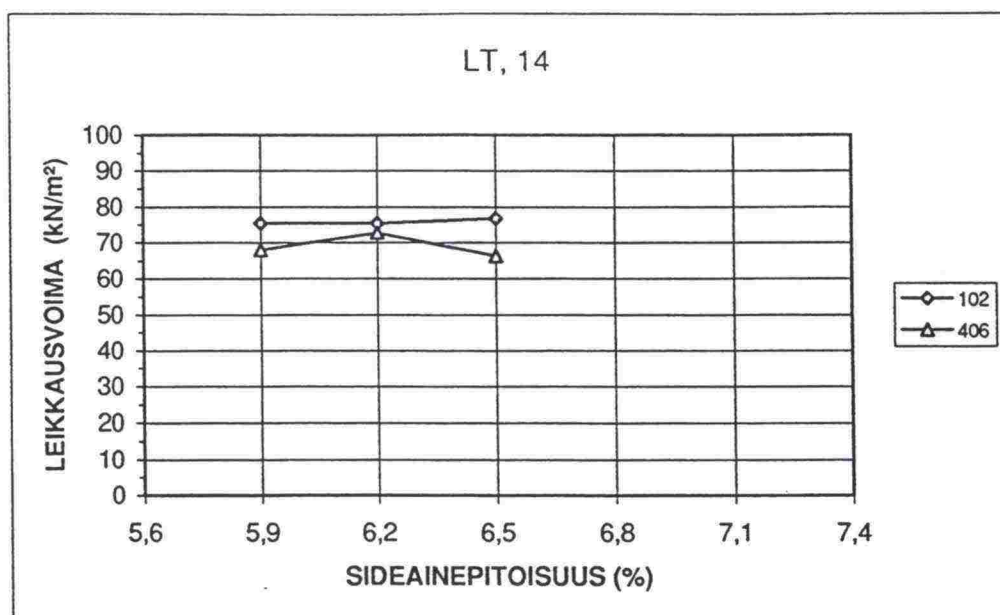
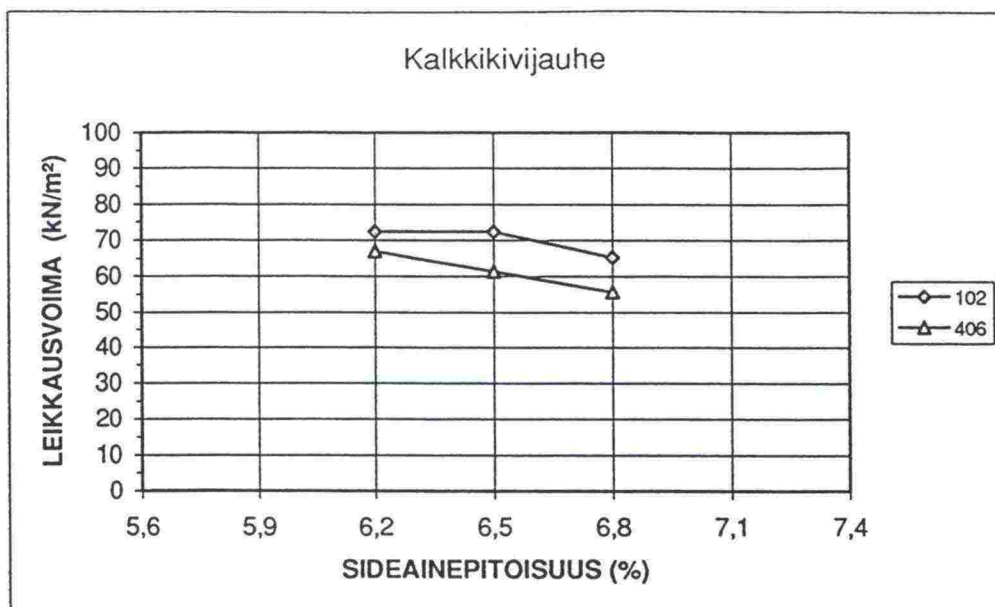
Kuvassa 9 on esitetty EA 20-massan leikkausvoimat eri hienoaineksilla (100 %). Suhteituksen perusteella vedenkestokokeisiin valittiin optimisideainepitoisuuden omaavat massat, joiden leikkausvoimien keskiarvot 102 tiivistyskierroksen jälkeen olivat välillä 60 - 68 kN/m² ja tiheydet välillä 2281 - 2418 kg/m³. EA 20-massalla sideainepitoisuudet tiivistettävyyssko-

keissa olivat lentotuhkilla 5,0 - 6,8 % sekä optimisideainepitoisuudet välillä 5,0 - 6,5 %.

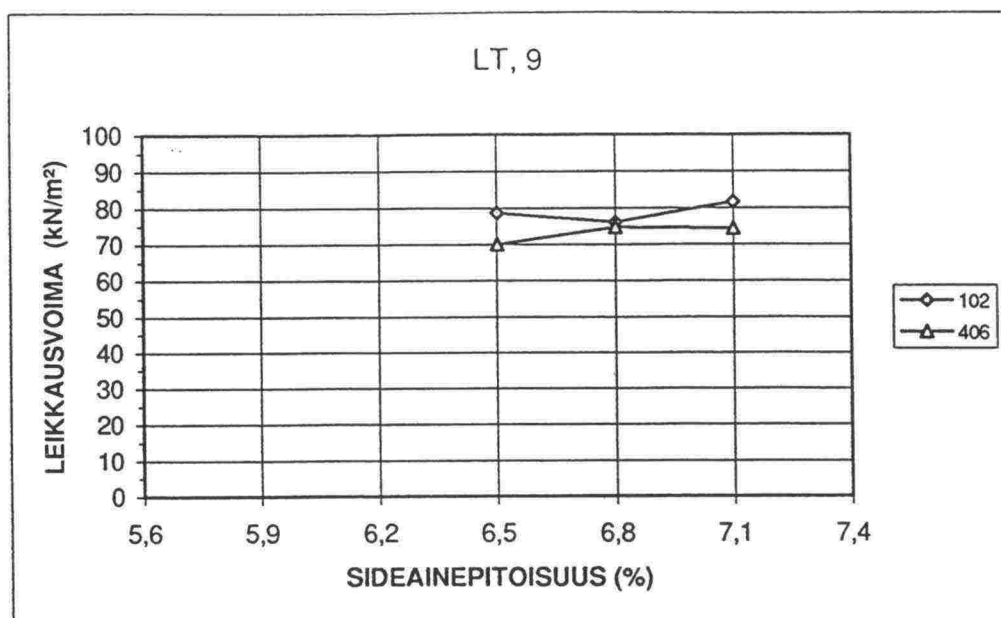
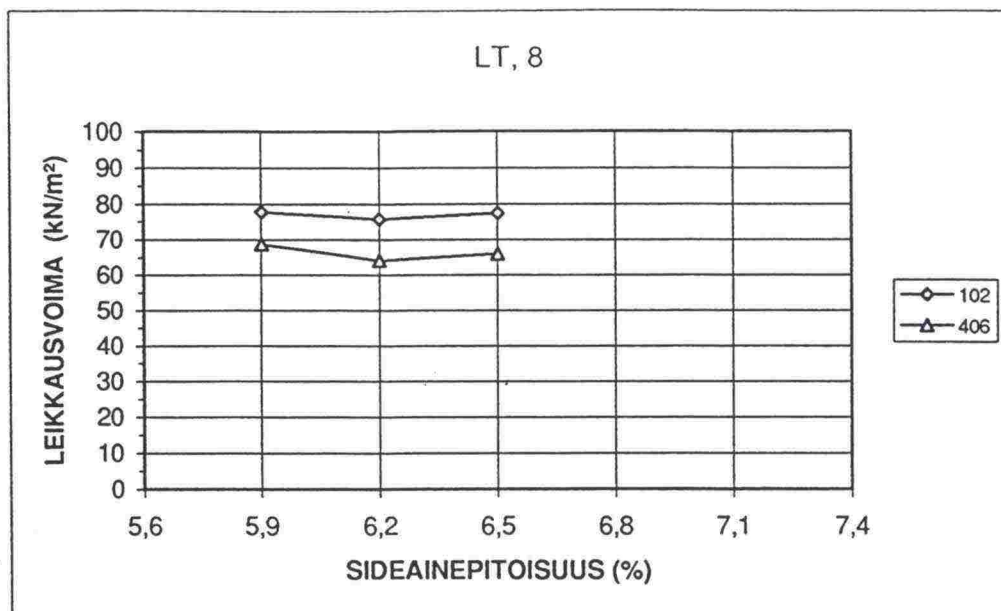


Kuva 9. EA 20 -massan leikkausvoimat eri hienoaineksilla (100 %) ja sideainepitoisuuksilla 102 kierroksen tiivistystyön jälkeen.

Kuvissa 10 - 11 on esitetty SMA 20 -massan leikkausvoimat eri sideainepitoisuuksilla ja hienoaineksilla keskiarvokäyrinä. Yksittäistulokset selviävät liitteestä 2. Suhteituksen kannalta toimivimmalla täyttöasteella (noin 85 %) leikkausvoimien keskiarvot 102 tiivistyskierroksen jälkeen olivat välillä 72 - 77 kN/m² ja tiheydet välillä 2127 - 2169 kg/m³. Vastaavat arvot 406 tiivistyskierroksen jälkeen olivat 61 - 75 kN/m² ja 2210 - 2239 kg/m³. Optimisideainepitoisuudet tuhkaominaisuuksista riippuen olivat välillä 6,3 - 6,8 %.



Kuva 10. SMA 20 -massan leikkausvoimat eri hienoaineksilla (100 %) ja sideainepitoisuuksilla 102 ja 406 kierroksen tiivistystyön jälkeen.



Kuva 11. SMA 20 -massan leikkausvoimat eri hienoaineksilla (100 %) ja sideainepitoisuuksilla 102 ja 406 kierroksen tiivistystyön jälkeen.

Täyttöaste, joka ilmoittaa sideaineen täyttämän osuuden prosentteina kiviaineksen tyhjätilasta, kasvoi luonnollisesti sideainepitoisuuden lisääntyessä. Sideainetarve oli hyvin riippuvainen lentotuhkan ominaisuuksista. Tuhkasta riippuen optimisideainepitoisuudet EA-massalla olivat rinnakkaisnäytteiden keskiarvona välillä 5,0 - 6,5 %, jolloin täyttöasteet olivat samaa suuruusluokkaa (noin 85 - 88 %). Kalkkikivijauhetta hienoaineksena käytettäessä sideainemäärä oli sama kuin lentotuhkaa 14 käyttäen (liite 3). Vastaavasti SMA-massoilla optimisideainepitoisuudet olivat lentotuhkilla välillä 6,3 - 6,8 %, jolloin täyttöasteet olivat noin 83 %. Pienin sideainemäärä oli lentotuhkaa 14 käytettäessä ja suurin lentotuhkaa 9 käytettäessä. Kalkkikivijauhetta hienoaineksena käyttäen sideainepitoisuudeksi tuli 6,5 % (liite 4).

Tyhjätilat selviävät liitteistä 3 ja 4. Tyhjätila lasketaan massan ja päällysteen tiheyksistä ja se ilmoittaa ilmahuokosten osuuden prosentteina päällysteen tilavuudesta. Tyhjätila-arvot lentotuhkaa käyttäen EA-massoilla olivat optimisideainepitoisuudella välillä 1,6 - 3,2 % ja kalkkikivijauhetta hienoaineksena käyttäen 2,2 %. SMA-massoilla vastaavat tyhjätila-arvot optimisideainepitoisuudella olivat välillä 3,0 - 3,3 % ja 3,1 %.

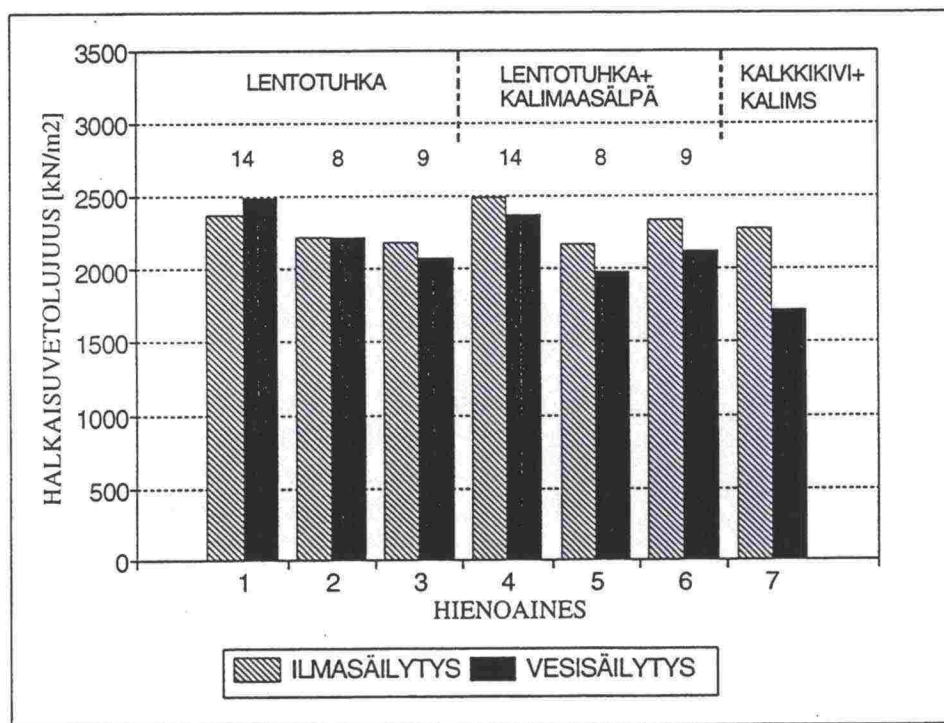
Kiviaineksen tyhjätilat on esitetty liitteissä 3 ja 4. Kiviaineksen tyhjätilalla ymmärretään kiviainesrakeiden väleihin jäävän tilan (sideaine + tyhjätila) osuutta prosentteina päällysteen tilavuudesta. EA-massoilla lentotuhkia hienoaineksena käyttäen kiviaineksen tyhjätilat olivat optimisideainemäärällä välillä 13,9 - 18,0 % ja kalkkikivijauhetta hienoaineksena käyttäen 14,1 %. SMA-massoilla kiviaineksen tyhjätilat olivat vastaavasti lentotuhkilla välillä 17,3 - 18,6 % ja kalkkikivijauheella 18,0 %.

4.3 Vedenkestokoe

Vedenkestokokeet tehtiin EA 20-massalla, jossa hienoainespitoisuus on suuri (12 %) ja rakenne suhteellisen avoin. Hienoaineksiksi valittiin lentotuhkat 8, 9 ja 14, joita käytettiin hienoaineksina sellaisenaan (100 %) ja yhdessä kalimaasälvän (<0,074 mm) kanssa suhteessa 50 % / 50 %. Vertailuhienoaineksena oli kaikkikivijauheen ja kalimaasälvän seos (50 % / 50 %). Tiivistyskokeiden perusteella valittiin massojen koostumus niin, että ne olisivat toiminnallisilta ominaisuuksiltaan vertailukelpoiset. Optimisideainepitoisuudeksi lentotuhkaa 14 (100 %) käyttäen tuli 5,0 %, lentotuhkaa 8 käyttäen 5,4 % ja lentotuhkaa 9 käyttäen 6,5 %. Hienoainesseoksille sideainepitoisuus valittiin massan käyttäytymisen sekä aikaisempien kokeiden ja tutkimusten perusteella. Lentotuhkan 14 ja kalimaasälvän (50 % / 50 %) seosta hienoaineksena käyttäen massan sideainepitoisuus oli 5,0 %, lentotuhkaa 8 ja kalimaasälpää käyttäen 5,1 % sekä lentotuhkaa 9 ja kalimaasälpää käyttäen 6,0 %. Vertailuhienoainesta käyttäen sideainepitoisuus oli 5,0 %.

Vedenkestoa kuvaavan halkaisuvetolujuuskokeen tulokset on esitetty liitteessä 5 ja kuvassa 12, jossa arvot ovat kuuden rinnakkaisnäytteen keskiarvoja. Yksittäisten ilmasäilytteisten koekappaleiden halkaisuvetolujuusarvot kaikki massat huomioiden olivat välillä 1911,5 - 2813,6 kN/m². Lentotuhkia 14, 8 ja 9 hienoaineksia käytettäessä halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ko. massoilla olivat 2375,2, 2211,1 ja 2179,3 kN/m². Lentotuhkien ja kalimaasälvän seosta käyttäen vastaavat arvot olivat 2490,6, 2174,5 ja 2342,8 kN/m² sekä kalkkivijauheen ja kalimaasälvän seosta käyttäen 2283,2 kN/m². Ilmasäilytteisten massojen keskiarvoksi saatiin 2293,8 kN/m².

Vesisäilytteisten, hyväksytyjen koekappaleiden halkaisuvetolujuudet olivat välillä 1427,1 - 2768,8 kN/m². Lentotuhkia 14, 8 ja 9 hienoaineksina käyttäen halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ko. massoilla olivat 2486,3, 2221,7 ja 2077,6 kN/m². Tuhkien ja kalimaasälvän seosta käyttäen vastaavat arvot olivat 2376,8, 1982,3 ja 2129,1 kN/m² sekä kalkkivijauheen ja kalimaasälvän seosta käyttäen 1714,2 kN/m². Kaikkien vesisäilytteisten massojen keskiarvoksi saatiin 2141,2 kN/m².



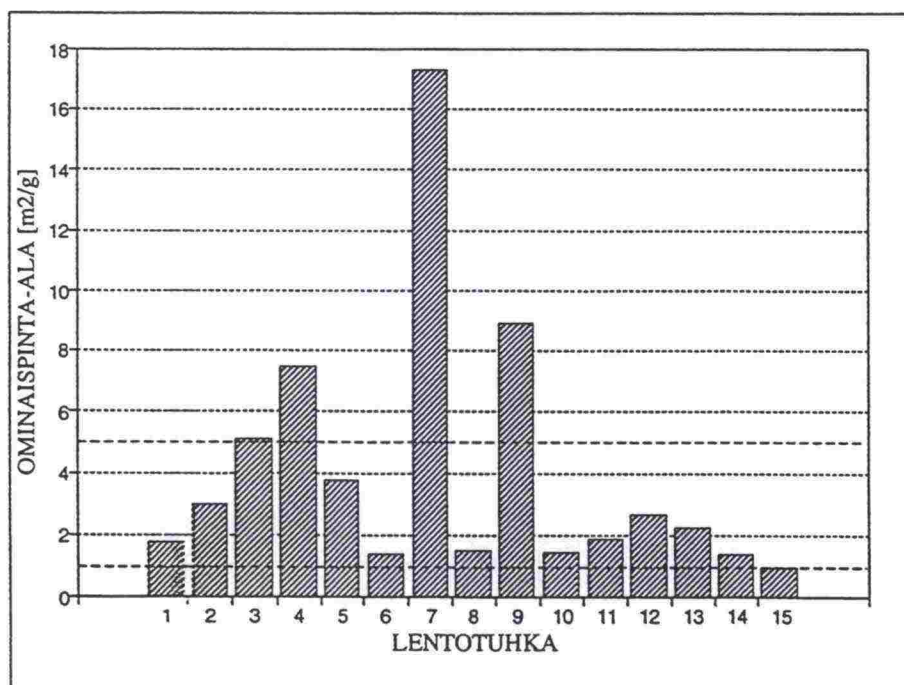
Kuva 12.

Koekappaleiden halkaisuvetolujuudet keskiarvoina vedenkestokokeessa.

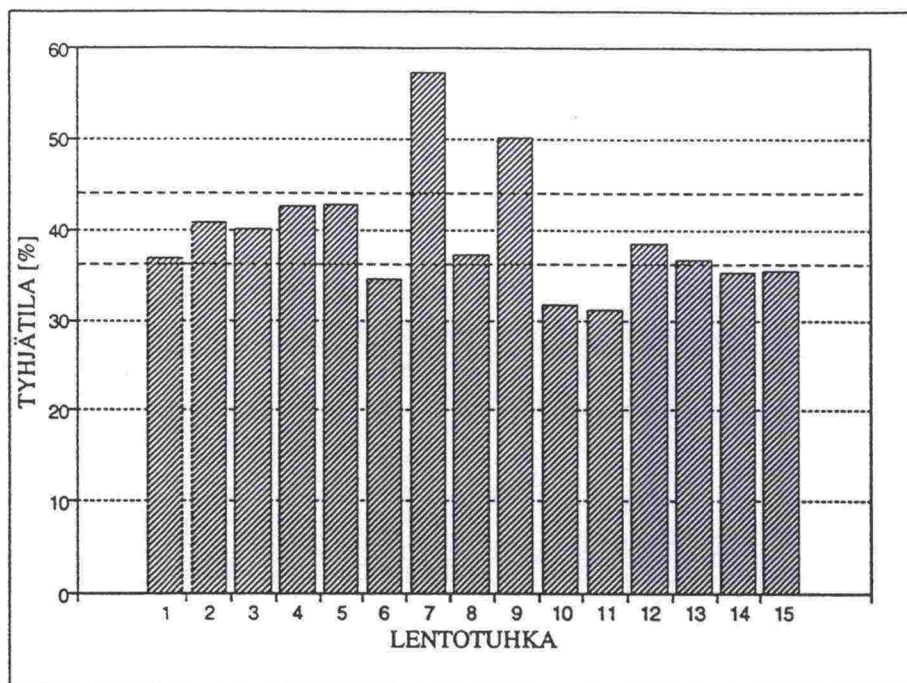
5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Lentotuhkien ominaisuudet

Tarkasteltaessa tutkittujen 15 lentotuhkan ominaispinta-ala- ja tyhjätila-arvoja Asfalttinormien vaatimusten perusteella havaitaan vain kuuden tuhkan täyttävän hienoainesseoksille asetetut vaatimukset. Vaadittava ominaispinta-ala-arvo ylittyy neljällä tuhalla ja vaadittava tyhjätila alittuu tai ylittyy seitsemällä tuhalla (kuvat 13-14). Koska Asfalttinormien vaatimukset koskevat lopullista hienoainesseosta, voidaan normien vaatimuksia täyttämättömiäkin lentotuhkia käyttää päällysteessä hyvälaatuisen toisen hienoaineksen (esim. päällystekiviaineksen oma hienoaines) kanssa. Tällöin on kuitenkin laboratoriokokein varmistettava, että hienoainesseos täyttää Asfalttinormien vaatimukset.



Kuva 13. Lentotuhkien ominaispinta-alat.



Kuva 14. Lentotuhkien tyhjätilat.

Selvästi suurimmat ominaispinta-ala-, tyhjätila- ja hehkutushäviöarvot on saatu lentotuhkalla 7, joka muista tuhista poiketen sisältää 20 - 30 % puuteollisuuden kuorituhkaa. Kyseinen lentotuhka poikkeaa muista tuhista myös alhaisen kiintotiheyden ja $< 0,075$ mm:n läpäisyarvon perusteella. Sillä on myös suurin vedenadsorptionarvo (%), mutta ero muihin tuhkiin on vähäinen.

Tulosten perusteella havaitaan selvästi, ettei vedenadsorptio neliometriä kohti (mg/m^2) sovellu laatuksiteriksi lentotuhkille ainakaan nykyisillä normivaatimuservoilla. Esimerkiksi lentotuhkalla 7, jolla on poikkeavan korkeat ominaispinta-ala- ja tyhjätila-arvot, vedenadsorptioarvo on alhaisin eli $1,7 \text{ mg/m}^2$. Toisaalta taas lentotuhkat 1 ja 8, joilla ominaispinta-ala- ja tyhjätila-arvot täyttävät selkeästi Asfalttinormien vaatimukset, eivät täytä vaatimuksia vedenadsorption ($< 10 \text{ mg/m}^2$) suhteen. Lentotuhkille sopisi paremmin vedenadsorptiovaatimus $> 5 \text{ mg/m}^2$. Kuvassa 18 on esitetty lentotuhkien ominaispinta-alan ja vedenadsorption (mg/m^2) välinen korrelaatio.

Taulukossa 3 esitetään lentotuhkien perusominaisuuksien väliset korrelaatiokertoimet sekä taulukossa 4 perusominaisuuksien ja kemiallisten koostumusten väliset korrelaatiokertoimet. Kyseessä on aina kahden muuttujan välinen lineaarinen korrelaatio. Taulukoissa on esitetty vain niiden muuttu-

jien väliset korrelaatiokertoimet, joilla on keskenään merkitsevä (**, riskitaso 1 %) tai erittäin merkitsevä (***, riskitaso 0,1 %) korrelaatio.

Taulukko 3. Lentotuhkanäytteiden (n = 15) perusominaisuuksien (taulukko 1) väliset korrelaatiokertoimet (r).

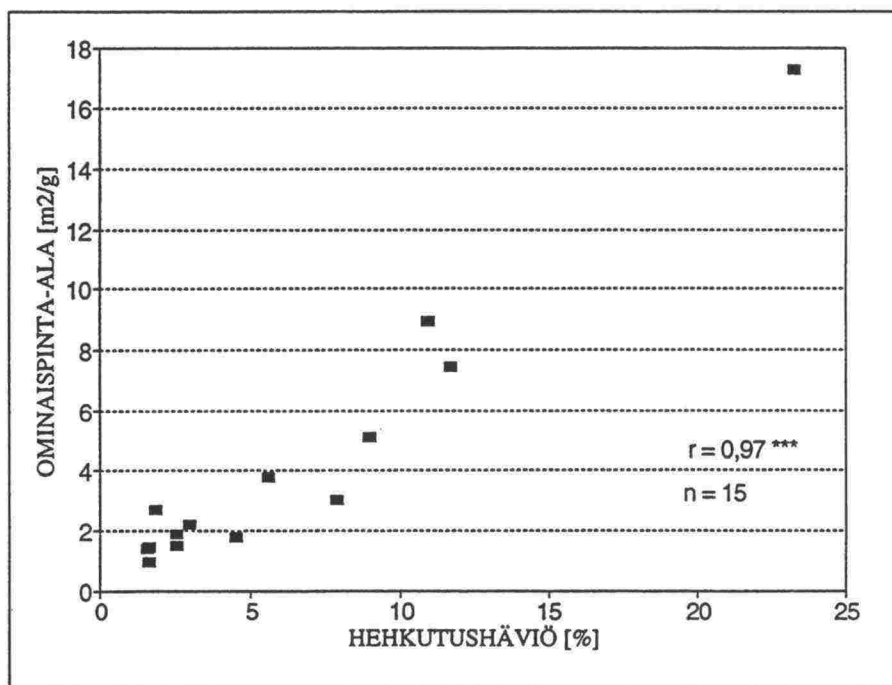
Muuttujat	r	
hehk.häviö alkup. / hehk.häviö < 0,075	0,99	***
omin.pinta-ala / hehk.häviö < 0,075	0,97	***
omin.pinta-ala / hehk.häviö alkup.	0,96	***
omin.pinta-ala / tyhjättila	0,93	***
tyhjättila / hehk.häviö < 0,075	0,92	***
tyhjättila / hehk.häviö alkup.	0,88	***
hehk.häviö alkup. / < 0,075 mm läp.	-0,80	***
hehk.häviö < 0,075 / < 0,075 mm läp.	-0,75	**
omin.pinta-ala / kiintotih.	-0,70	**
hehk.häviö < 0,075 / kiintotih.	-0,70	**
hehk.häviö alkup. / kiintotih.	-0,66	**

Taulukko 4. Lentotuhkanäytteiden (n = 14) perusominaisuuksien (taulukko 1) ja kemiallisten koostumusten (liite 2) väliset korrelaatiokertoimet (r).

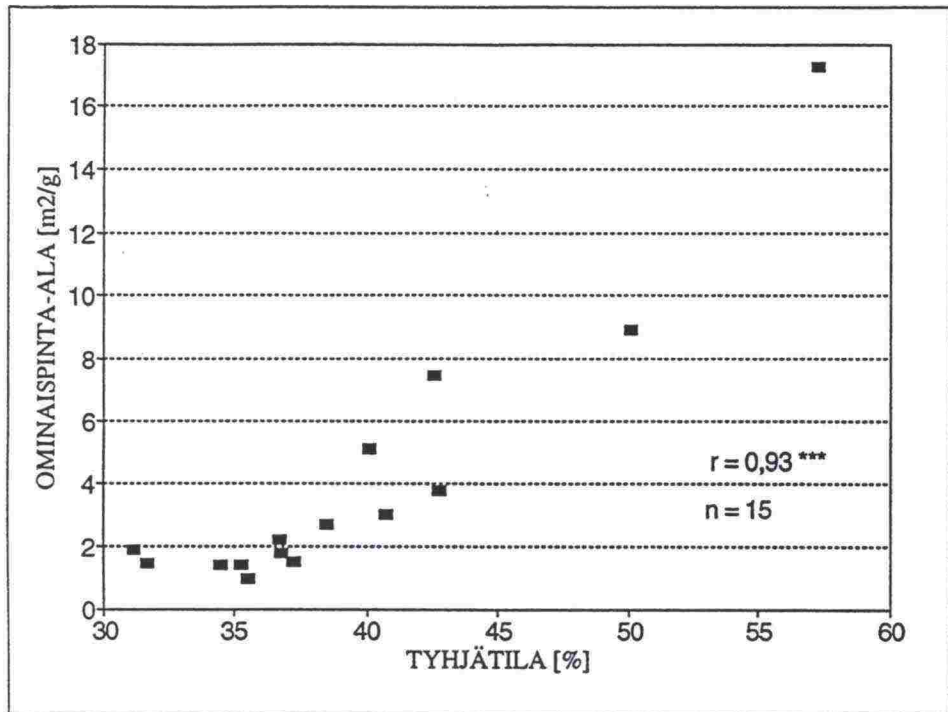
Muuttujat	r	
hehk.häviö < 0,075 / C	1,00	***
hehk.häviö alkup. / C	0,99	***
omin.pinta-ala / C	0,97	***
tyhjättila / C	0,91	***
hehk.häviö < 0,075 / SiO ₂	-0,81	***
hehk.häviö alkup. / SiO ₂	-0,80	***
vapaa CaO / Al ₂ O ₃	-0,80	***
omin.pinta-ala / SiO ₂	-0,74	**
vedenads. % / SiO ₂	-0,74	**
< 0,075 mm läp. / C	-0,74	**
hehk.häviö alkup. / Mn	0,73	**
< 0,075 mm läp. / Zn	-0,71	**
omin.pinta-ala / CaO	0,70	**
vedenads. % / S	0,70	**
hehk.häviö alkup. / CaO	0,70	**
hehk.häviö alkup. / Zn	0,70	**
kiintotih. / C	-0,69	**
hehk.häviö < 0,075 / CaO	0,69	**
hehk.häviö < 0,075 / Mn	0,68	**
omin.pinta-ala / Mn	0,67	**
tyhjättila / SiO ₂	-0,67	**
< 0,075 mm läp. / Mn	-0,67	**

Kuten taulukosta 3 ilmenee lentotuhkan ominaispinta-ala korreloi hyvin hehkutushäviön ($r = 0,97$) ja tyhjätilan ($r = 0,93$) kanssa. Luonnollisesti myös tyhjätila korreloi hyvin hehkutushäviön ($r = 0,92$) kanssa. Mainitut riippuvuudet esitetään kuvissa 15-17.

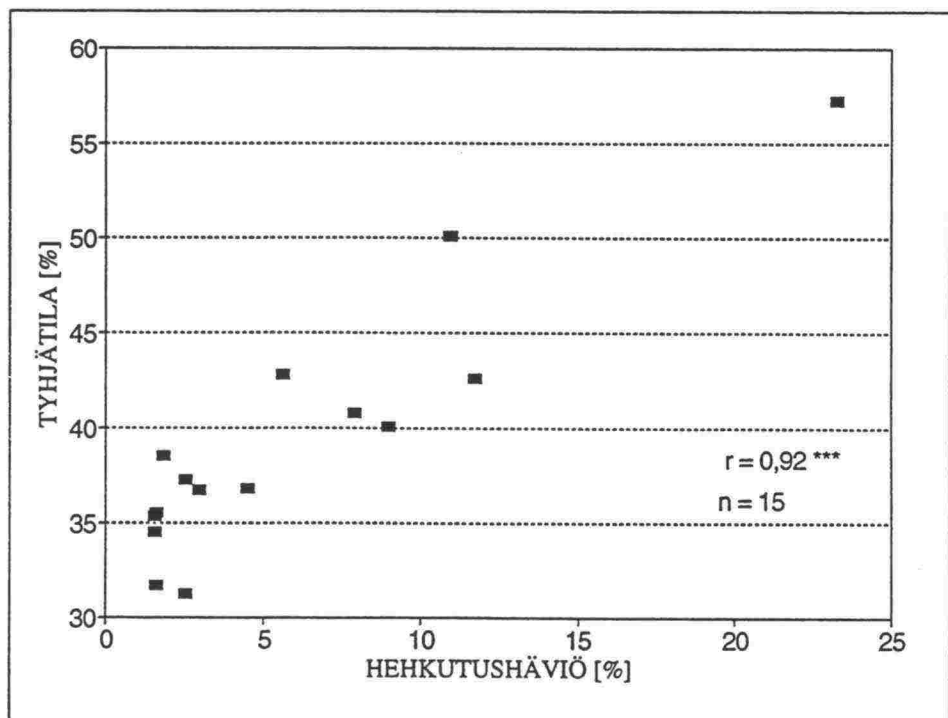
Esimerkiksi ASTO-projektissa käytetyillä kiviaineksilla havaittiin hienoaineksen ominaispinta-alan ja vedenadsorption (%) korreloivan hyvin keskenään ($r = 0,88$ ***, $n = 33$). Lentotuhkilla vastaavaksi korrelaatiokertoimeksi saatiin vain 0,49. Ominaispinta-alan ja vedenadsorption neliometriä kohti (vedenadsorptio / ominaispinta-ala, mg/m^2) välinen $r = -0,55$ *. Mikäli tarkastellaan edellä mainittujen muuttujien ei-lineaarista korrelaatiota, saadaan korrelaatiokertoimen arvoksi $-0,80$ *** (kuva 18). Kaikkien ominaispinta-alaltaan $> 2 \text{ m}^2/\text{g}$ lentotuhkien vedenadsorptio on $< 10 \text{ mg}/\text{m}^2$ ja toisaalta kaikki $> 10 \text{ mg}/\text{m}^2$ vedenadsorptioarvot on saatu tuhkillä, joilla ominaispinta-ala on $< 2 \text{ m}^2/\text{g}$. Kuten aiemmin jo mainittiin vedenadsorptiota neliometriä kohti ei voida käyttää lentotuhkien laatukriteerinä ainakaan nykyisillä normivaatimusarvoilla.



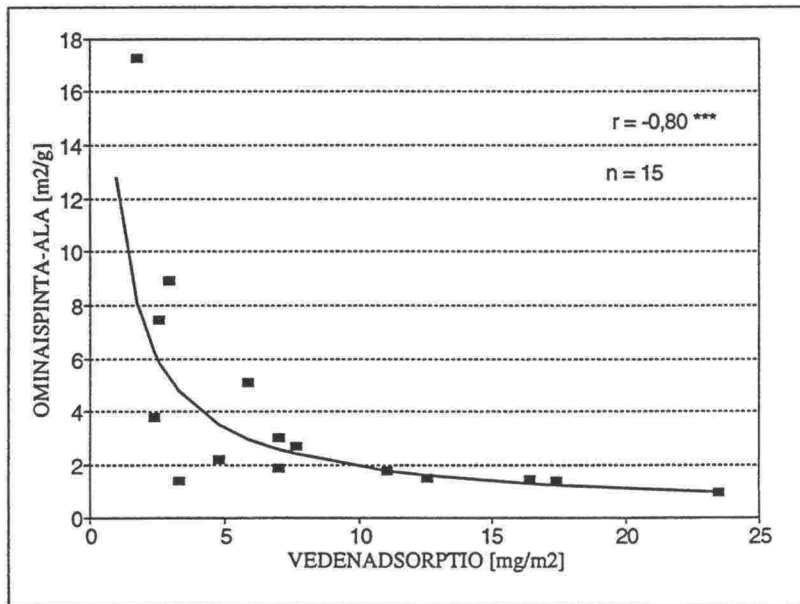
Kuva 15. Lentotuhkien ominaispinta-alan ja hehkutushäviön välinen riippuvuus.



Kuva 16. Lentotuhkien ominaispinta-alan ja tyhjätilan välinen riippuvuus.

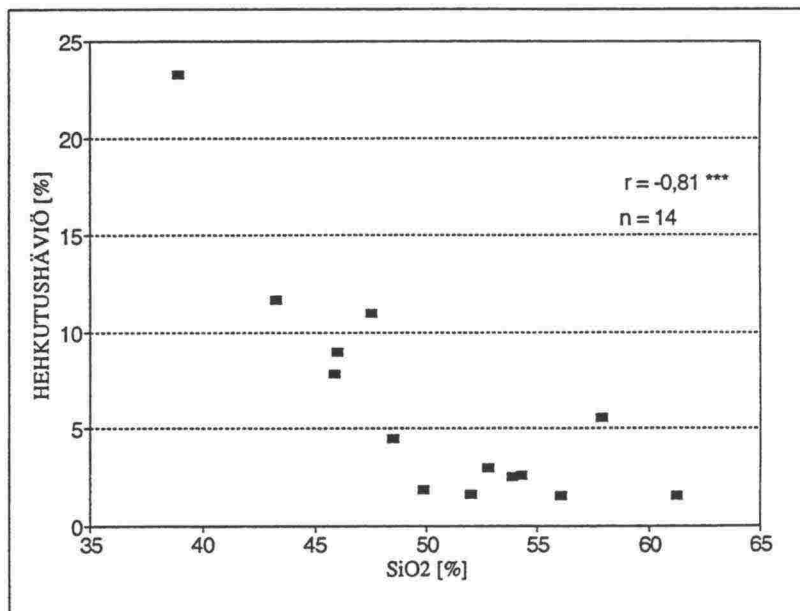


Kuva 17. Lentotuhkien tyhjätilan ja hehkutushäviön välinen riippuvuus.



Kuva 18. Lentotuhkien ominaispinta-alan ja vedenadsorption (mg/m^2) välinen korrelaatio.

Taulukon 4 riippuvuuksia tarkasteltaessa todetaan kemiallisen analyysin hiilipitoisuuden C korreloivan hyvin hehkutushäviön kanssa. Lisäksi hehkutushäviö korreloi melko hyvin ($r = -0,81^{**}$) piidioksidipitoisuuden SiO_2 kanssa (kuva 19). Lentotuhkien SiO_2 -pitoisuuden lisääntyessä niiden hehkutushäviöarvot pienenevät.



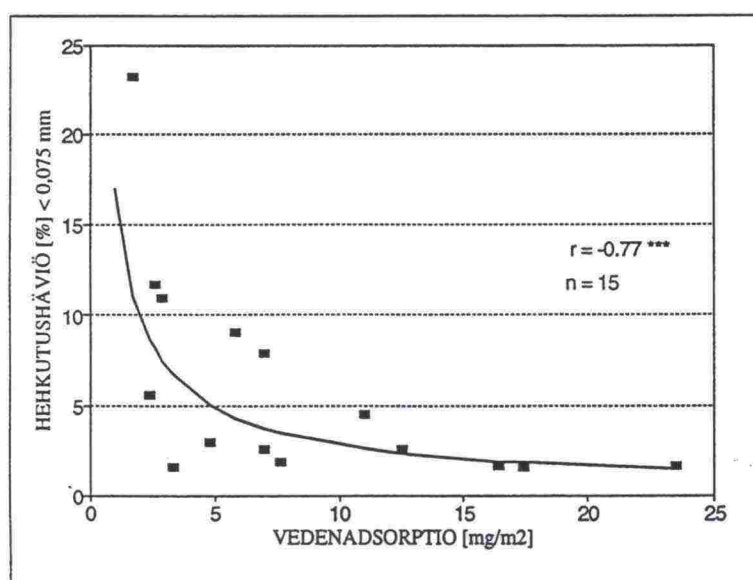
Kuva 19. Lentotuhkien hehkutushäviön ja SiO_2 -pitoisuuden välinen korrelaatio.

Tarkasteltaessa varsinkin vedenadsorption neliometriä kohti ja muiden muuttujien välisiä riippuvuuksia havaitaan, ettei korrelaatio ole lineaarinen. Ei-lineaarissa tarkastelussa, jossa korrelaatiokäyrä on muotoa $y = e^{(alnx+b)}$ saadaan vedenadsorption (mg/m^2) ja muiden muuttujien välille seuraavanlaisia korrelaatiokertoimen (r) arvoja:

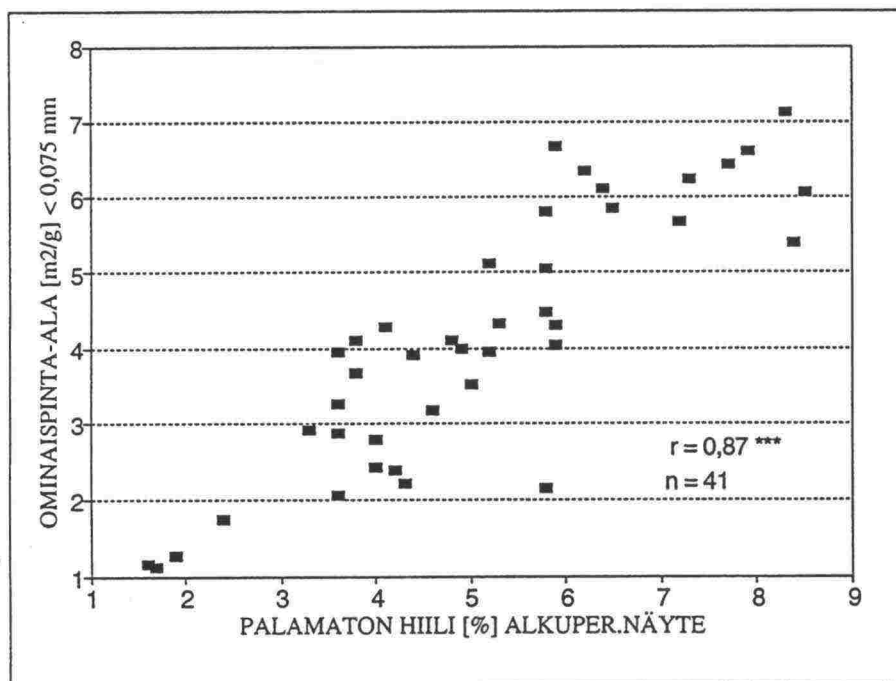
vedenadsorptio / ominaispinta-ala	-0,80 ***	(n = 15)	(kuva 18)
/ hehkutushäviö, < 0,074 mm	-0,77 ***	(n = 15)	(kuva 20)
/ C-pitoisuus, kem.analyysi	-0,77 **	(n = 14)	
/ tyhjätila	-0,72 **	(n = 15)	
/ hehkutushäviö, alkuper. näyte	-0,72 **	(n = 15)	

Kuvien 5-8 tulosten perusteella yhden voimalaitoksen lentotuhkan laatu voi vaihdella hyvinkin paljon lyhyessä ajassa. Esimerkiksi tarkasteltavassa voimalaitoksessa kahden vuorokauden sisällä tuhkan palamattoman hiilen määrä (%) vaihteli pääosin prosessiteknisistä syistä lähes 5 yksikköä. Ominaispinta-alaan (m^2/g) tällaisella vaihtelulla on vaikutusta yli 3 yksikköä.

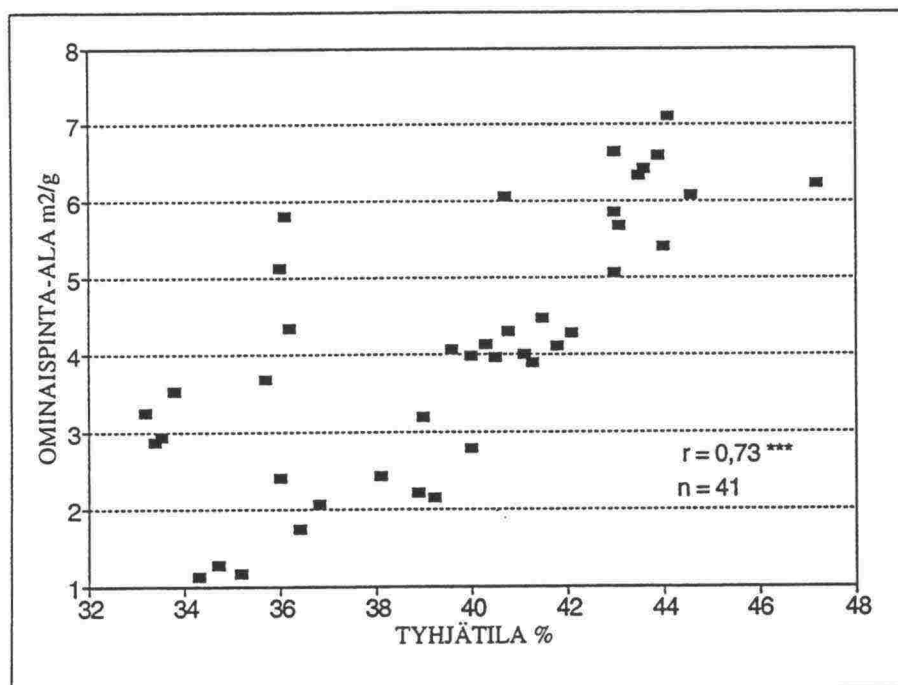
Myös kyseisen voimalaitoksen lentotuhkan ($n = 41$) ominaispinta-ala korreloi hyvin hiilipitoisuuden ($r = 0,87$ ***) ja tyhjätilan ($r = 0,73$ ***) kanssa. Tyhjätilan ja hiilipitoisuuden välinen korrelaatiokerroin $r = 0,73$ ***. Edellä mainitut korrelaatiot (lineaarinen korrelaatio) esitetään kuvissa 21 - 23. Kuvassa 22, jossa esitetään ominaispinta-alan ja tyhjätilan riippuvuus toisistaan, havaitaan selvästi kaksi erillistä pistejoukkoa: pääjoukko ja sen vasemmalla puolella oleva pienempi pistejoukko. Pienempi pistejoukko edustaa niitä lentotuhkia, joiden kiintotiheys on $\leq 2,20 \text{ g}/\text{cm}^3$. Sen sijaan yhtenäisen pääjoukon kaikkien tunkien kiintotiheydet ovat vähintään $2,20 \text{ g}/\text{cm}^3$.



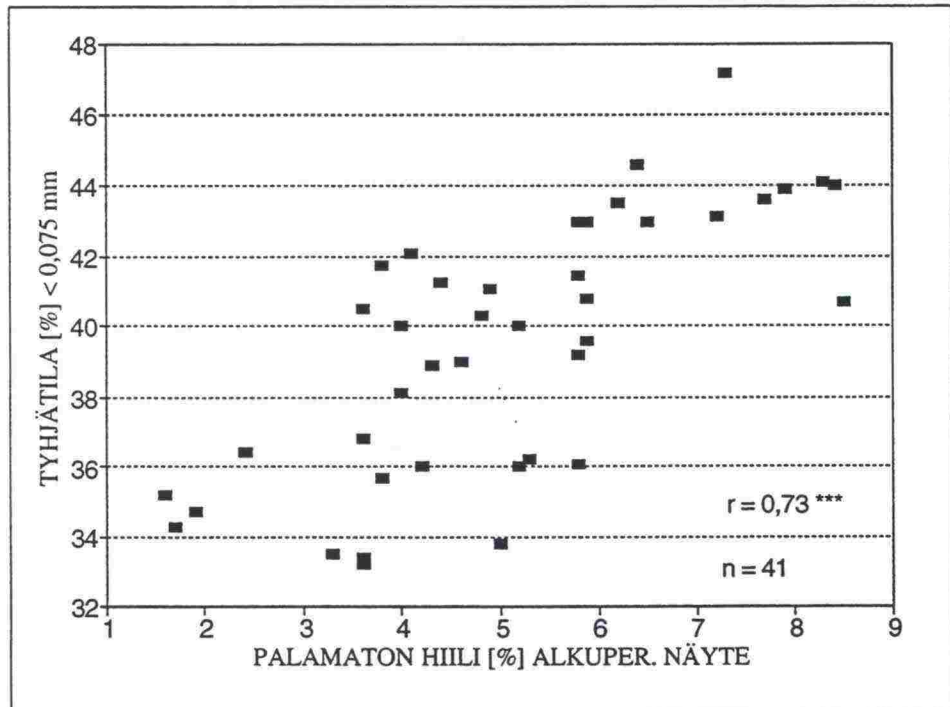
Kuva 20. Lentotuhkien hehkutushäviön (< 0,075 mm) ja vedenadsorption neliometriä kohti välinen riippuvuus.



Kuva 21. Yhden voimalan lentotuhkan ominaispinta-alan ja palamattoman hiilen määrän välinen riippuvuus.



Kuva 22. Yhden voimalan lentotuhkan ominaispinta-alan ja tyhjätilan määrän välinen riippuvuus.



Kuva 23. Yhden voimalan lentotuhkan tyhjätilan ja palamattoman hiilen määrän välinen riippuvuus.

5.2 Tiivistettävyys

Erilaisia hienoaineksia sisältävien SMA 20 ja EA 20 -massojen sideainepitoisuus- ja tiivistysominaisuudet testattiin ICT-kiertotiivistimellä. Hienoaineksen vaikutus sideainepitoisuuteen sekä vaikutus päällysteen ominaisuuksiin on esitetty kuvissa 24 - 25. Päällystemassan tiheyden ja leikkausvoiman muutokset keskiarvoina tiivistyskertojen funktiona on esitetty kuvissa 27 - 28.

Suhteituksen perusteella massojen keskinäiseen tarkasteluun pyrittiin valitsemaan sellaiset SMA-massat, joiden täyttöaste oli noin 85 % ja joiden kiviaineksen tyhjätila olisi tyhjätalakäyrän vaakasuoralla osuudella sekä lukuarvot välillä 16 - 20 %. Valintakriteerinä oli myös tyhjätila, jonka tulisi olla arvojen 2 - 4 % välillä. Lukuarvojen lisäksi valintakriteerinä oli massojen visuaalinen tarkastelu. EA-massoilla täyttöasteen tulisi olla välillä 80 - 90 % ja tyhjätilan välillä 1 - 3 % sekä kiviaineksen tyhjätilan välillä 13 - 17 %.

Kuvassa 24 on esitetty SMA-massojen tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat sekä täyttöasteet eri hienoainesten ja sideainepitoisuuden suhteen. Tulokset ovat rinnakkaisnäytteiden keskiarvoja. Yksittäistulokset ovat liitteessä 4.

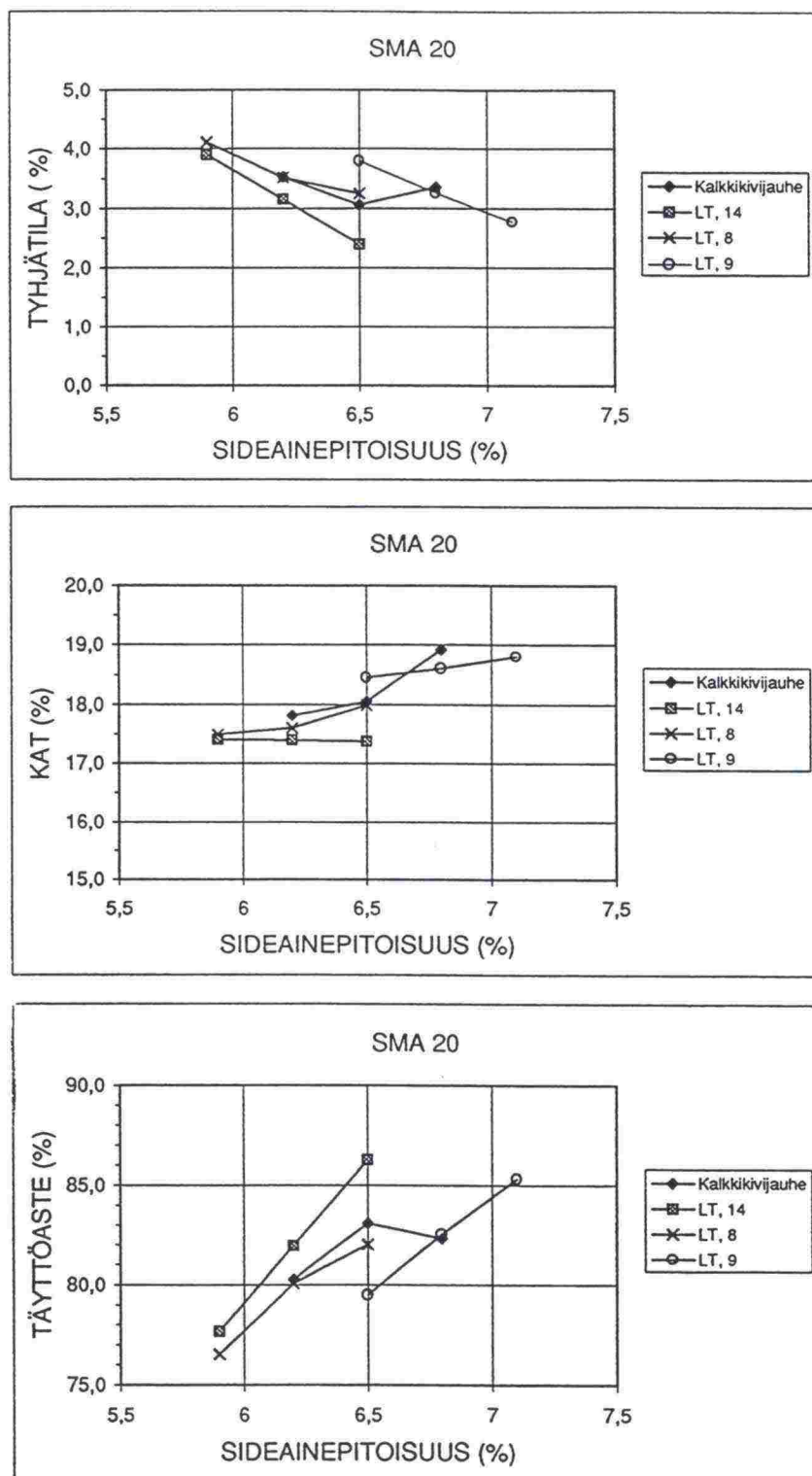
Taulukossa 5 on esitetty optimisideainepitoisuudessa saadut SMA- ja EA-massojen ominaisuudet eri hienoaineksilla.

Taulukko 5. Optimisideainepitoisuus ja sillä saadut SMA- ja EA-massojen ominaisuudet eri hienoaineksilla (* = lukuarvot arvioituja).

OMINAISUUS	SMA -MASSA				EA -MASSA				
	Kalkki-kivijauhe	Lentotuhka			Kalkki-kivijauhe	Lentotuhka			
		14	8	9		14	8	9	4 *
Optimisideainepitoisuus, %	6,5	6,3	6,5	6,8	5,3	5,0	5,4	6,5	6,7
Täyttöaste, %	83,1	83,2	82,0	82,5	87,2	84,9	89,0	82,5	86,1
Tyhjätila, %	3,1	3,0	3,2	3,3	1,9	2,1	1,8	3,2	2,6
Kiviaineksen tyhjätila, %	18,0	17,3	18,0	18,6	14,5	13,9	14,2	17,9	16,8

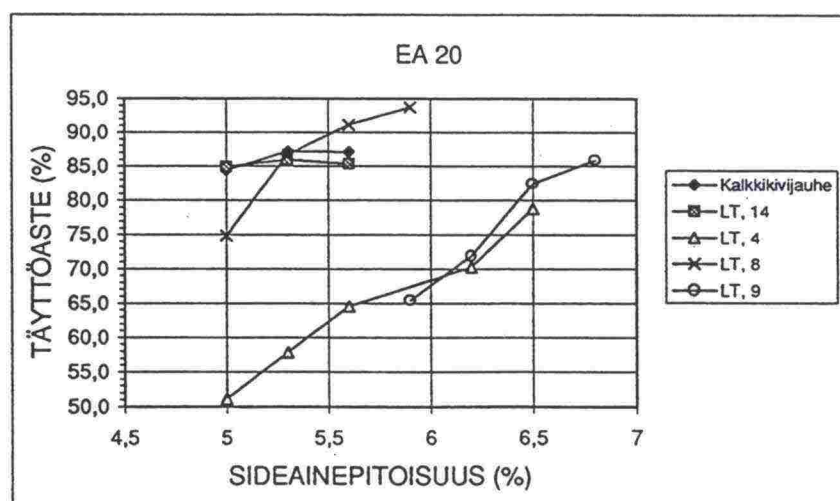
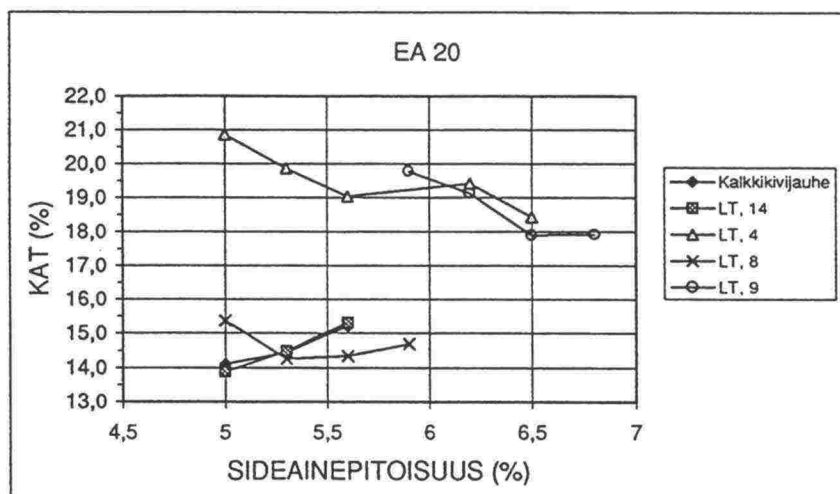
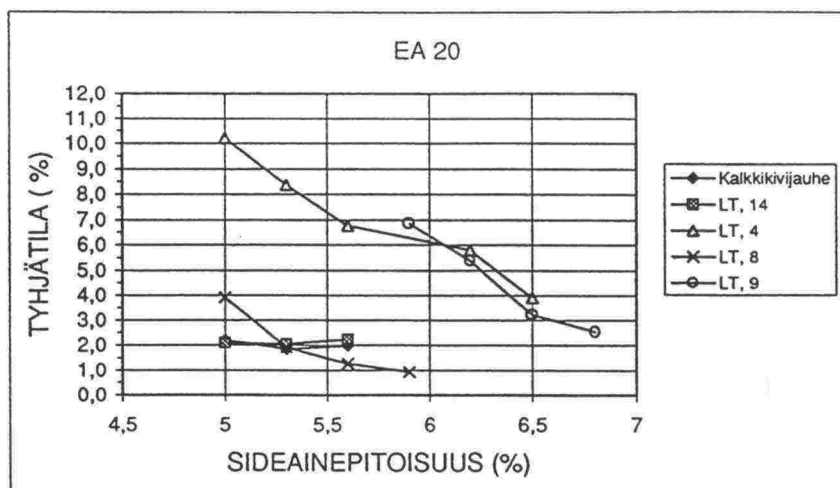
Lentotuhkien käyttäytyminen oli riippuvainen niiden ominaispinta-alasta. Lentotuhkilla 8 ja 14 SMA-massat käyttäytyivät suhteellisesti samanlailla. Suuren ominaispinta-alan omaava lentotuhka 9 vaati sideainetta selvästi enemmän, mutta sen käyttäytyminen ei muutoin poikennut muista lentotuhkista. Kalkkikivijauheeseen verrattuna lentotuhkalla 8 saatiin aivan samanlaisia lukuarvoja. Tuhkaa 14 hienoaineksena käytettäessä optimisideainepitoisuuteen päästiin 0,2 prosenttiyksikköä pienemmällä sideainemäärällä kuin kalkkikivijauhetta tai lentotuhkaa 8 hienoaineksena käyttäen. Lentotuhkaa 9 käytettäessä optimisideainepitoisuus oli 0,3 prosenttiyksikköä suurempi kuin kalkkikivijauhetta käyttäen.

Kuvassa 25 on esitetty EA-massojen tyhjätilat, kiviaineksen tyhjätilat ja täyttöasteet eri hienoainesten ja sideainepitoisuuden suhteen. Tulokset ovat rinnakkaisnäytteiden keskiarvoja. Yksittäistulokset on esitetty liitteessä 3.



Kuva 24.

SMA-massan tyhjätila, kiviaineksen tyhjätila ja täyttöaste eri hienoainekseen ja sideainepitoisuuden funktiona.



Kuva 25.

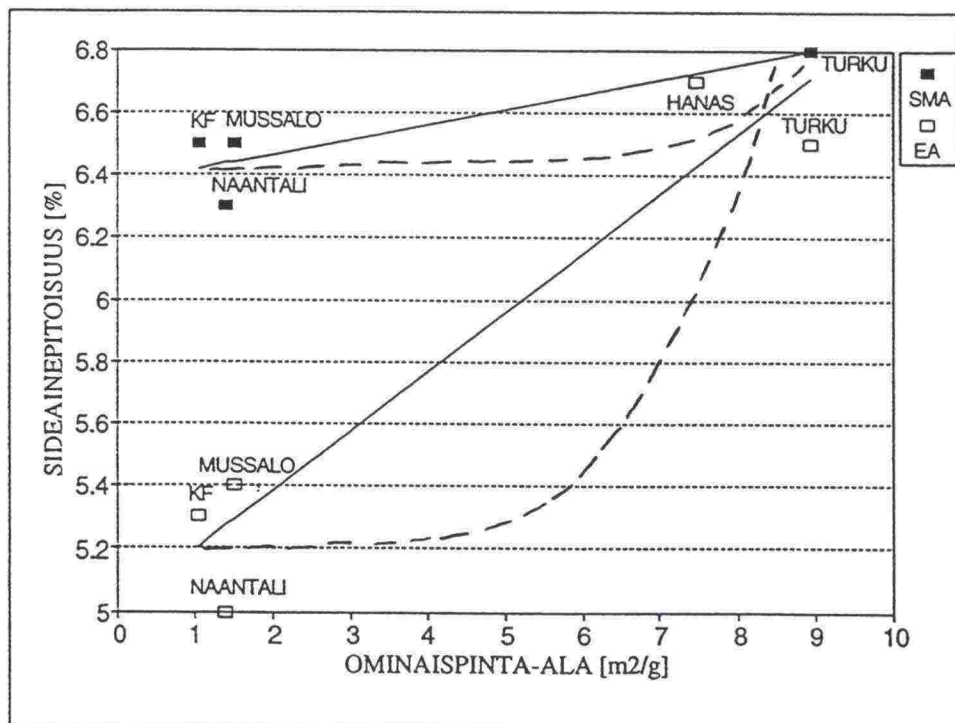
EA-massan tyhjättila, kiviaineksen tyhjättila ja täyttöaste eri hie-
noainesten ja sideainepitoisuuden funktiona.

EA-massassa lentotuhkan vaikutus sideainepitoisuuteen oli riippuvainen etenkin lentotuhkan ominaispinta-alasta. Lentotuhkaa 14 käytettäessä optimisideainepitoisuudeksi tuli 5,0 %, mikä on 0,3 prosenttiyksikköä pienempi kuin kalkkikivijauhetta käyttäen. Lentotuhkaa 8 käytettäessä sideainepitoisuudeksi saatiin 5,4 %, mikä on 0,1 prosenttiyksikkö suurempi kuin kalkkikivijauhetta käyttäen. Suuren ominaispinta-alan omaavilla lentotuhkilla 4 ja 9 optimisideainepitoisuuksiksi saatiin 6,5 ja 6,7 % eli 1,2 - 1,4 prosenttiyksikköä kalkkikivijauheella saatua arvoa suuremmat.

Lentotuhkien rakeisuudella oli ilmeisesti myös vaikutusta sideainepitoisuuden määräytymiseen. Lentotuhkilla 8 ja 14 oli samanlainen ominaispinta-ala (1,51 ja 1,40 m²/g), mutta rakeisuuskäyrät erosivat toisistaan (kuvat 2 - 4). Lentotuhka 8 oli tasarakeisempi ja karkeampi kuin lentotuhka 14. Ero tuli näkyviin varsinkin EA-massassa, jossa massan ominaisuudet olivat lentotuhkaa 8 käytettäessä herkkiä sideainepitoisuuden muutoksille. Tarkastelussa on syytä muistaa lentotuhkan laatuvaihteluherkkyys ja se, että lentotuhkanäytteestä on tehty vain yksi ominaisuusmääritys.

Lentotuhkien suhteelliset vaikutukset olivat massatyypeistä riippuvaisia. SMA-massassa lentotuhka 8 käyttäytyi aivan samanlailla kuin kalkkikivijauhe. EA-massassa lentotuhka 14 käyttäytyi kalkkikivijauheen kaltaisesti, mutta kuitenkin niin, että optimisideainepitoisuus saatiin alhaisemmalla sideainemäärällä.

Kuvassa 26 on esitetty massakokeisiin valittujen lentotuhkien ominaispinta-alan vaikutus optimisideainepitoisuuteen SMA- ja EA-massoilla. Kokeisiin valittiin vain pienen ja suuren ominaispinta-alan omaavia lentotuhkia, joiden vapaan kalkin määrä vaihteli. Tällöin puuttuvat tiedot keski-suuren ominaispinta-alan omaavien lentotuhkien vaikutuksesta massojen ominaisuuksiin. Kuvaan on piirretty arvioidut tuhkien mahdolliset vaikutuskäyrät: suoraviivainen sekä funktionaalinen, jossa ominaispinta-alan vaikutus sideainepitoisuuteen kasvaa voimakkaasti määrätyn ominaispinta-ala-arvon ylitettyään.



Kuva 26. Lentotuhkan ominaispinta-alan vaikutus optimisideainepitoisuuteen SMA- ja EA-massoilla.

SMA-massan tyhjätilat eri hienoaainesten optimisideainepitoisuuksilla olivat kaikilla samanlaiset arvojen ollessa välillä 3,0 - 3,3 %. Arvojen määrittämisestä johtuen hienoainekset käyttäytyivät sideainepitoisuuden suhteen kuten täyttöasteet. Kiviaineksen tyhjätilat olivat välillä 17,3 - 18,6 %. Täyttöasteet, jotka pyrittiin suhteituksessa saamaan samaan tasoon, olivat välillä 82,0 - 83,2 %.

EA-massan tyhjätilat olivat vastaavasti välillä 1,9 - 3,2 % ja kiviaineksen tyhjätilat välillä 13,9 - 17,9 %. Lentotuhkan ominaispinta-alan vaikutus näkyi selkeästi ko. arvoissa. Täyttöasteet olivat välillä 82,5 - 88,0 % tavoitteen ollessa optimisideainepitoisuudella 80 - 90 %.

Optimisideainepitoisuuden omaavan päällystemassan tiheyden ja leikkausvoiman muutokset keskiarvoina eri hienoaaineksilla tiivistyskierrosten funktiona on esitetty kuvissa 27 ja 28. SMA-massassa hienoainekseen vaikutus tiheyteen ja leikkausvoimaan oli vähäinen. Leikkausvoima 102 tiivistyskierroksen jälkeen oli kalkkikivijauhetta käyttäen 72 kN/m^2 ja lentotuhkia käyttäen välillä $76 - 77 \text{ kN/m}^2$. Vastaavat leikkausvoimat 406 kierroksen jälkeen olivat 61 kN/m^2 ja $66 - 75 \text{ kN/m}^2$.

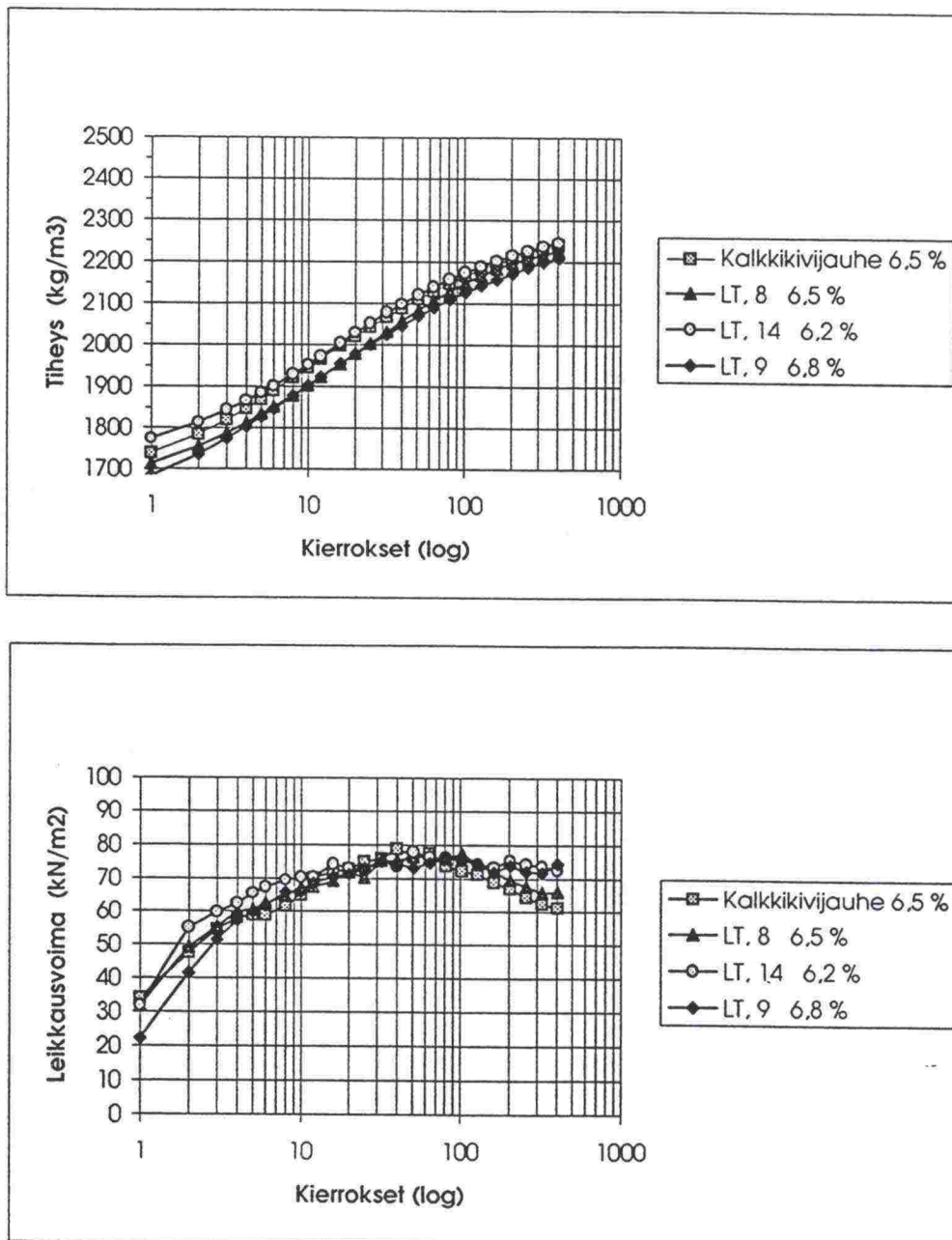
Hienoaainesten vaikutus massan tiheyteen oli myös vähäinen. Lopputuloksiin lentotuhkien kiintotiheyseroilla ei ollut vaikutusta. Lentotuhkalla 14 kiintotiheys oli $2,40 \text{ g/cm}^3$, kun se muilla massakokeissa olleilla tuhilla oli

välillä 2,19 - 2,28 g/cm³. Kalkkikivijauheen kiintotiheys oli 2,73 g/cm³. Lopputiheydet olivat massoilla välillä 2210 - 2239 kg/m³.

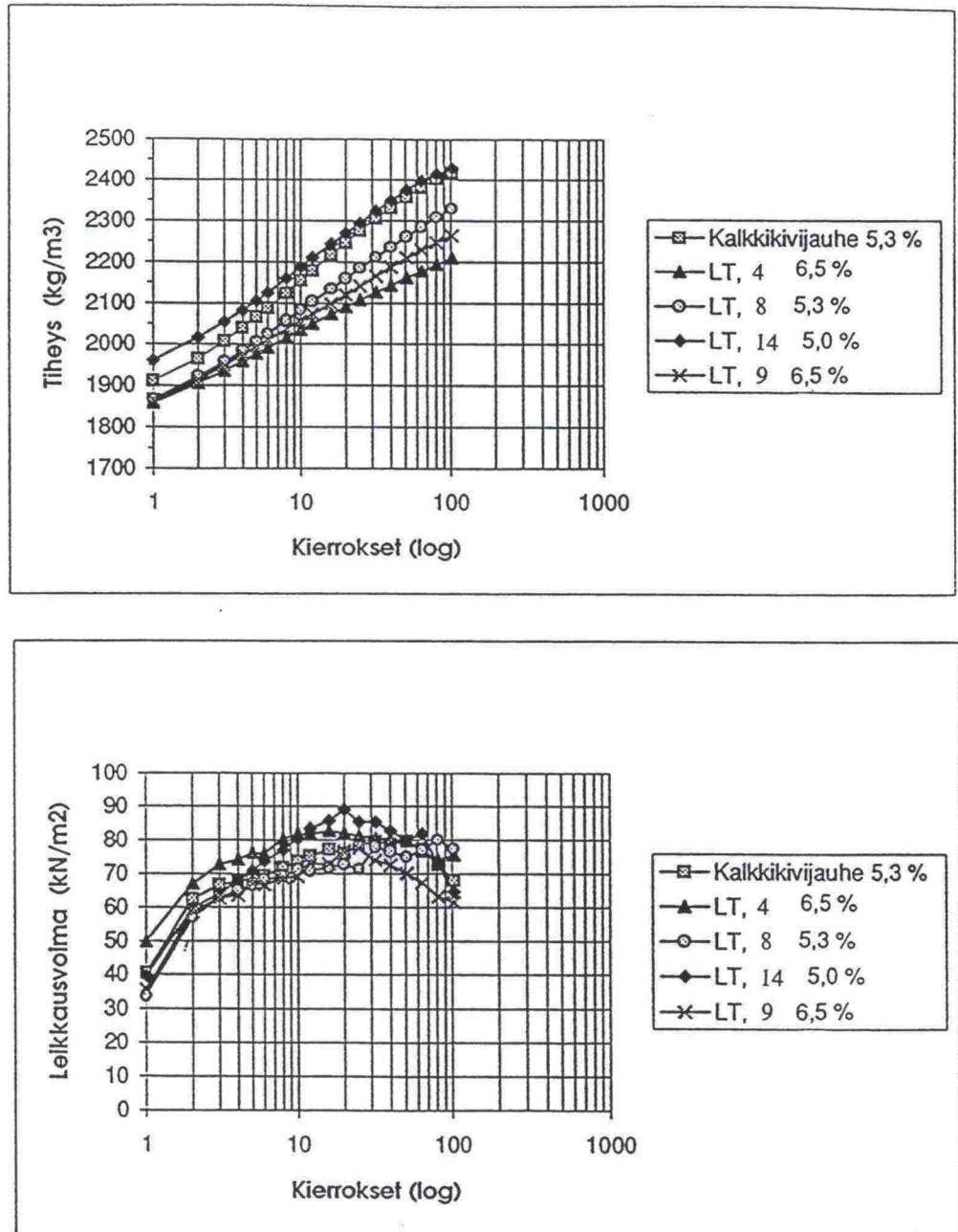
Optimiseainepitoisuuden omaavilla EA-massoilla eri hienoaineksilla oli vaikutusta varsinkin massan tiheyteen ja jonkin verran myös leikkausvoimaan. Kokeet tehtiin vain 102 tiivistyskertaa asti, koska leikkausvoimat alenivat sen jälkeen jo selvästi. Leikkausvoimat olivat välillä 60 - 77 kN/m². Lentotuhkalla 14 oli samanlainen vaikutus tiheyteen kuin kalkkikivijauheella. Lopputiheydet olivat 2418 kg/m² ja 2401 kg/m². Alhaisimmat tiheydet saatiin suuren ominaispinta-alan omaavilla lentotuhkilla, joilla massan tiheydeksi saatiin 2248 kg/m² ja 2281 kg/m². Lentotuhkalla 8, jolla ominaispinta-ala oli samaa luokkaa lentotuhkan 14 ja kalkkikivijauheen kanssa, massan tiheydeksi tuli 2339 kg/m². Alhaisempi tiheysarvo johtunee suhteistuneesta rakeisuudesta.

Hienoainesten vaikutus leikkausvoimaan sideainepitoisuuden funktiona on esitetty kuvissa 9 - 11. SMA-massan rakeisuusominaisuuksista johtuen sideainepitoisuuden vaihtelu ei vaikuttanut käytetyillä sideainepitoisuuksilla kovinkaan paljon leikkausvoimaan. Lentotuhkilla 8 ja 14 sideainepitoisuuden muuttuessa 0,6 prosenttiyksikköä leikkausvoimat muuttuivat 102 tiivistyskierroksen kohdalla 2 kN/m² ja 406 kierroksen jälkeen 5 - 7 kN/m². Vastaavat arvot kalkkikivijauheella olivat 7 ja 11 kN/m². Lentotuhkalla 9 arvot olivat 6 ja 5 kN/m². Tulosten mukaan kalkkikivijauhe oli muita hienoaineksia hieman herkempi sideainepitoisuuden muutokselle.

EA-massassa sideainepitoisuuden vaikutus oli huomattavasti voimakkaampi kuin SMA-massassa ja myös eri hienoainesten erot olivat selvemmät. Suuren ominaispinta-alan omaavia lentotuhkia käytettäessä sideainepitoisuuden muutosten vaikutus oli vähäisempi kuin alhaisen ominaispinta-alan omaavia lentotuhkia käytettäessä. Optimiseainepitoisuuden kasvaessa 0,3 prosenttiyksikköä alenivat leikkausvoimat alhaisen ominaispinta-alan omaavia tuhkia käytettäessä 22 - 44 kN/m². Kalkkikivijauhetta käyttäen leikkausvoiman vastaava aleneminen oli 33 kN/m². Voimakkain leikkausvoiman pieneneminen oli lentotuhkaa 14 hienoaineksena käyttäen.



Kuva 27. SMA-massan tiheys ja leikkausvoima tiivistyskestoja funktiona eri hienoaineksilla optimisideainepitoisuudella. Optimisideainepitoisuus on ilmoitettu hienoainestunnuksen perässä.



Kuva 28. EA-massan tiheys ja leikkausvoima tiivistyskertojen funktiona eri hienoaineksilla optimisideainepitoisuudella. Optimisideainepitoisuus on ilmoitettu hienoainestunnuksen perässä.

5.3 Vedenkesto

Hienoaineksen vaikutus massojen vedenkestoon testattiin EA 20-massalla, jossa hienoainespitoisuus on suuri ja rakenne suhteellisen avoin. Kiviainekseksi valittiin Teiskon granodioriitti huonon tarttuvuusominaisuutensa ja tunnettavuutensa vuoksi. Lisäksi hienoainesseoksissa hienona kiviaineksenä käytettiin kalimaasälpää, jolla aikaisempien kokeiden perusteella on erittäin huono tarttuvuus bitumisiin sideaineisiin ja sitä kautta myös aiheuttaa koko massan huonon vedenkeston. Suhteituksen perusteella tehdyistä päällystelaatoista porattiin koekappaleita, joista osaa säilytettiin ilma- ja toista osaa vesisäilytyksessä kuusi kuukautta. Säilytyksen jälkeen koekappaleille tehtiin halkaisuvetokoe.

Vedenkestokokeiden tulokset on esitetty liitteessä 5, jossa ovat yksittäistulokset sekä massojen keskiarvotulokset ja keskihajonnat, sekä kuvissa 12 ja 29 - 31. Kuvassa 29 on esitetty massojen tarttuvuusluku eri hienoaineksinä. Tarttuvuusluku on laskettu vesikäsiteltyjen ja kuivien koekappaleiden halkaisuvetolujuuden välisenä suhteena. Kuvissa 30 ja 31 on esitetty ilma- ja vesisäilytysten koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvot.

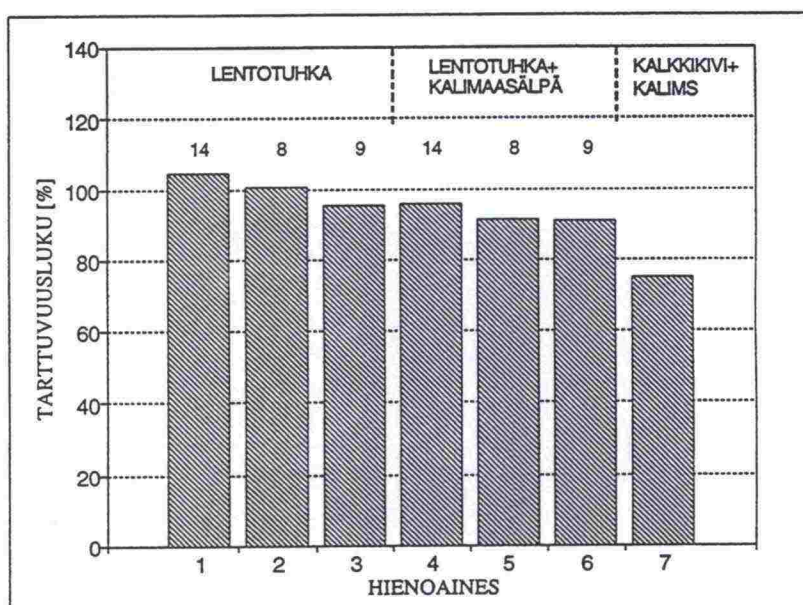
Lentotuhkan vaikutus massojen vedenkestoon oli riippuvainen tuhkan ominaisuuksista, joskin suhteelliset erot olivat vähäiset. Parhaat tulokset saatiin lentotuhkaa 14 käyttäen, jolla ominaispinta-ala oli pieni ($1,40 \text{ m}^2/\text{g}$) ja vapaan kalkin (CaO) määrä suhteellisen suuri (0,30 %). Lentotuhkan 9 ominaispinta-ala oli suuri ($8,93 \text{ m}^2/\text{g}$) ja vapaan kalkin määrä suhteellisen suuri (0,40 %). Lentotuhkalla 8 ominaispinta-ala oli pieni ($1,51 \text{ m}^2/\text{g}$) ja vapaan kalkin määrä alhainen ($< 0,05 \%$).

Lentotuhkaa 14 käyttäen halkaisuvetolujuudet olivat ilmasäilytteisillä koekappaleilla keskimäärin 7 - 9 % suurempia kuin lentotuhkilla 8 ja 9 saadut lujuudet. Lentotuhkan ja kalimaasälvän seosta käytettäessä lentotuhkalla 14 saadut lujuudet olivat 6 - 15 % suurempia kuin muilla tuhkillä saadut lujuudet. Kalkkikivijauheen ja kalimaasälvän seokseen verrattuna tuhkaa 14 käytettäessä lujuudet olivat 9 % suuremmat. Kalkkikivijauheen vaikutus kalimaasälvän kanssa oli samaa tasoa kuin tuhkillä 8 ja 9 saatu vaikutus.

Vesisäilytteisillä koekappaleilla lentotuhkan 14 vaikutus tartuntaa parantavasti halkaisuvetolujuuteen oli selkeämpi kuin ilmasäilytteisillä koekappaleilla. Lentotuhkaa 14 käyttäen lujuudet olivat 12 - 20 % suuremmat kuin muilla tuhkillä, kuten myös kalimaasälvän kanssa. Kalkkikivijauheen ja kalimaasälvän seokseen verrattuna lentotuhkan 14 ja kalimaasälvän seoksella saatiin 39 % suurempi halkaisuvetolujuus. Myös muihin tuhkiin verrattuna kalkkikivijauheella saatiin alhaisempia lujuuksia.

Halkaisuvetolujuusarvoa tarkasteltaessa voidaan todeta lentotuhkien alhaisen vapaan kalkin määrän vaikuttavan varsinkin kalimaasälpää sisältävissä massoissa antaen alhaisempia lujuusarvoja. Vaikutus oli selvin vesisäilytteisissä koekappaleissa. Myös suuri ominaispinta-ala vaikutti samansuuntaisesti, joskin lievemmin.

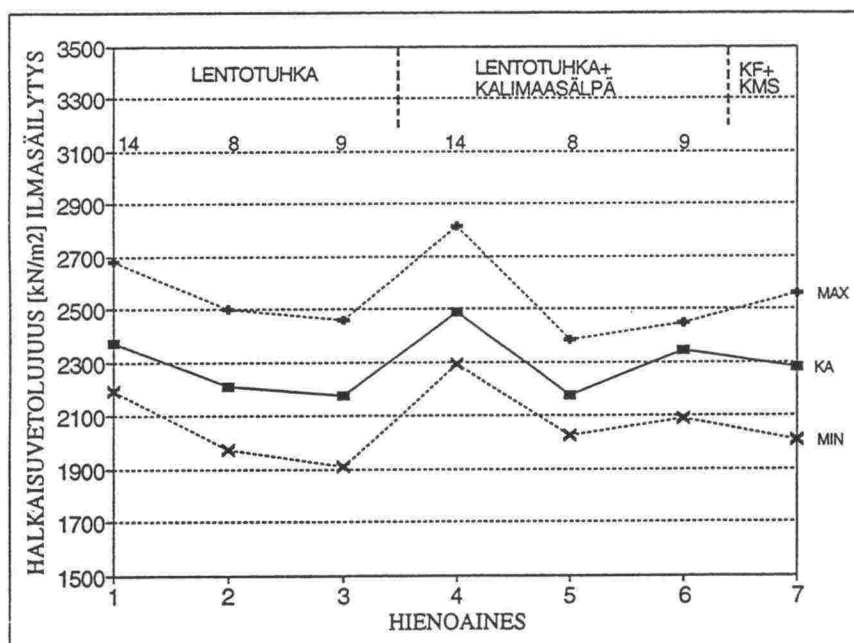
Kuvassa 29 on esitty massojen tarttuvuusluvut. Tarttuvuuslukua tarkasteltaessa voidaan todeta lentotuhkan 14 antaneen parhaimmat arvot sekä yksinään että kalimaasälvän kanssa. Kalimaasälpä hienoaineena heikensi kaikissa massoissa tarttuvuuslukua, mutta vaikutus oli selvin kalkkikivijauheen kanssa, jolloin tarttuvuusluku oli 75,1 %. Lentotuhkia käytettäessä vastaavat arvot olivat 90,9 - 95,4 %. Pelkän lentotuhkan ollessa hienoaineena tarttuvuusluvut olivat välillä 95,3 - 104,7 %. Tarttuvuuslukuna lentotuhkan toiminnallisia ominaisuuksia tarkasteltaessa vaikuttivat sekä suuri ominaispinta-ala että pieni vapaan kalkin määrä vedenkestoa heikentävästi, joskin kaikkia lentotuhkalla saatuja tarttuvuuslukuja on pidettävä hyvinä.



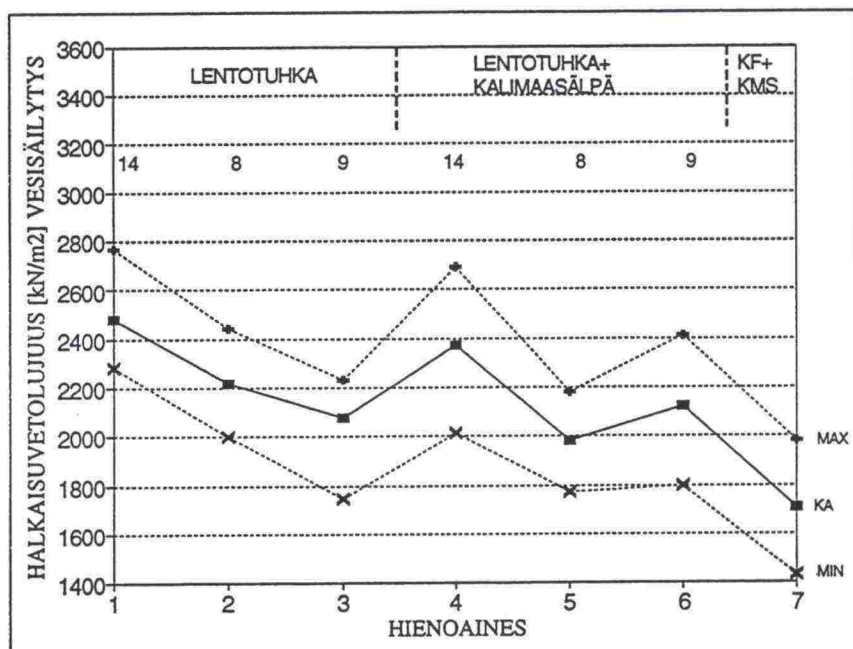
Kuva 29. Ilma- ja vesisäilytteisten koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien suhde tarttuvuuslukuna.

Halkaisuvetokokeen vesisäilytteisistä koekappaleista jouduttiin kolme hylkäämään ulkoisen tarkastelun ja muista selkeästi poikkeavien puristuslujuusarvojen takia. Koekappaleet olivat silmämääräisen tarkastelun perusteella osittain reikäisiä. Vesi oli päässyt vaikuttamaan tartuntaa heikentävästi näissä koekappaleissa selvästi nopeammin ja syvemmältä kuin tiiviimmissä koekappaleissa. Myös löyhempi rakenne on vaikuttanut halkaisuvetolujuutta heikentävästi, mutta veden suurempaa vaikutusta on pidettävä tärkeimpänä selittäjänä koekappaleiden romahtaneeseen vedenkestävyteen (liite 5).

Kuvissa 30 ja 31 esitettyjen halkaisuvetolujuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvojen mukaan eri koemassat käyttäytyivät hyvin samansuuntaisesti. Massojen halkaisuvetolujuusarvojen keskihajonnat on esitetty liitteessä 5. Vesisäilytteisillä koekappaleilla keskihajonnat olivat välillä 134,4 - 214,5 kN/m² ja ilmasäilytteisillä koekappaleilla välillä 122,2 - 192,0 kN/m².



Kuva 30. Ilmasäilytteen koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvot.



Kuva 31. Vesisäilytteen koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvot.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Taloudellisesti ja teknisesti onnistunut asfalttipäällyste edellyttää kaikkien päällysteessä olevien materiaalien ominaisuuksien tuntemusta ja hallintaa. Päällysteen kiviaineksen hienoainesosa voi olla kiviaineksen murskauksessa syntynyttä hienoainesta tai se voi olla erikseen lisättävää täytejauhetta. Täytejauheen tarkoituksena on täyttää hienoainesvajaus ja/tai sillä voidaan parantaa päällysteen suhteitus- ja toiminnallisia ominaisuuksia.

Kivihiilivoimaloissa syntyvä lentotuhka on potentiaalinen täytejauhe. Sen laatuominaisuuksiin vaikuttavat käytettävän kivihiilen lisäksi polttolaitos ja polttotekniikka. Tutkimuksen tulokset koskevat lentotuhkien osalta vain käytettyjä lentotuhkaeriä, eikä niitä voi suoraan yleistää koskemaan muita lentotuhkaeriä ja -laatuja. Tehdyistä kokeista voidaan vetää seuraavia johtopäätöksiä:

1. Lentotuhka soveltui kokeiden perusteella hyvin hienoainekseksi, jolla voidaan parantaa päällysteen suhteitus- ja toiminnallisia ominaisuuksia.
2. Lentotuhkien käyttö asfalttipäällysteen täytejauheena edellyttää aina toiminnallista ennakosuhteitusta lentotuhkan tavanomaisista kiviaineshienoaineksista poikkeavien ominaisuuksiensa vuoksi.
3. Lentotuhkan hienoainesominaisuudet on määritettävä aina käytettävästä lentotuhkaerästä sen mahdollisen suuren laatu- vaihtelun vuoksi. Laatua tulee seurata säännöllisesti.
4. Lentotuhkan ominaispinta-ala korreloi hyvin hehkutushäviönä määritetyn palamattoman hiilen määrän kanssa. Asfalttinormeissa oleva ominaispinta-alavaatimuksen yläraja ($< 5000 \text{ m}^2/\text{kg}$) alittui tutkituilla lentotuhilla, jos palamattoman hiilen määrä oli alle 5 %.
5. Vedenadsorptio neliömetriä kohti (mg/m^2) ei sovellu lentotuhkien laatuksiteriksi Asfalttinormien esittämässä muodossa. Kokeissa pienen ominaispinta-alan omaavat lentotuhkat ylittivät hienoainesvaatimuksen ($< 10 \text{ mg}/\text{m}^2$), kun taas suuren ominaispinta-alan omaavat lentotuhkat alittivat vaatimuksen. Lentotuhkat käyttäytyivät tässä suhteessa täysin poikkeavasti verrattuna kiviainesperäisiin hienoaineksiin.
6. Lentotuhkan ominaispinta-alalla oli selvä vaikutus sideainetarpeeseen. Mitä suurempi ominaispinta-ala oli, sitä enemmän sideainetta vaadittiin, jotta massojen toiminnalliset ominaisuudet olisivat samanlaiset.
7. Lentotuhkien vaikutus massan optimisideainepitoisuuteen riippui massatyypistä. SMA-massalla erot optimisideainepitoisuudessa eri lentotuhkien välillä olivat 0,5 %-yksikköä ja EA-massalla 1,7 %-yksikköä.

8. Kalkkikivijauheeseen verrattuna samansuuruisen ominaispinta-alan omaavalla lentotuhkalla saavutettiin optimisideainepitoisuus alhaisemmalla sideainemäärällä. Massasta riippuen erot olivat enimmillään 0,3 %-yksikköä.
9. Lentotuhkan rakeisuudella oli vaikutusta optimisideainepitoisuuteen sekä massan herkkyyteen sideainepitoisuuden muutoksille. Tasarakeisempi lentotuhka vaati hiemen suuremman sideainemäärän ja oli huomattavasti herkempi sideainepitoisuuden muutokselle kuin ominaispinta-alaltaan samansuuruinen, mutta rakeisuudeltaan hienompi lentotuhka.
10. Kaikilla lentotuhkilla oli vapaan kalkin määrästä ja ominaispinta-alaeroista huolimatta päällysteen vedenkestävyyttä parantava vaikutus. Kuitenkin suhteellisiin eroihin vaikuttivat pieni vapaan kalkin määrä ja suuri ominaispinta-ala vedenkestoa alentavasti. Kaikilla lentotuhkilla saatiin massan parempi vedenkestävyys, kuin vertailuhienoaineena olleella kalkkikivijauheella.

7 LIITTEET

- Liite 1. Lentotuhkien kemiallinen analyysi.
- Liite 2. Massojen tiheydet.
- Liite 3. Massojen EA20 suhteitustulokset.
- Liite 4. Massojen SMA20 suhteitustulokset.
- Liite 5. Vedenkestokokeen tulokset.

KEMIAALLISEN ANALYYSIN TULOKSET

NÄYTE NRO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	S	K ₂ O	CaO	Ti	V
1	1.15	2.50	26.2	48.5	0.351	0.268	2.47	4.24	0.661	0.037
2	1.15	2.42	25.7	45.9	0.410	0.340	2.46	4.15	0.649	0.039
3	1.40	2.26	24.8	46.0	0.343	0.474	2.23	4.45	0.655	0.035
4	1.16	2.19	25.1	43.3	0.401	0.338	2.23	3.93	0.616	0.037
5	0.91	2.09	20.1	57.9	0.195	0.214	1.36	4.13	0.757	0.026
6	0.74	1.06	23.4	61.2	0.393	0.097	1.66	2.97	0.554	0.015
7	0.92	1.93	19.1	38.9	0.360	0.470	2.07	5.69	0.534	0.031
8	0.69	1.70	24.8	54.3	0.269	0.309	2.11	3.51	0.566	0.024
9	1.00	2.53	22.0	47.5	0.262	0.625	2.30	5.14	0.605	0.029
10	1.14	2.13	25.9	52.0	0.374	0.342	2.29	3.91	0.668	0.041
11	0.81	2.77	22.7	53.9	0.234	0.389	2.20	4.95	0.564	0.026
12	1.22	2.43	28.0	49.9	0.353	0.365	2.59	3.77	0.662	0.036
13	0.67	2.85	22.5	52.8	0.188	0.374	2.13	4.66	0.645	0.030
14	0.99	1.95	23.3	56.1	0.183	0.284	2.17	3.16	0.687	0.028
KA	1.00	2.20	23.8	50.6	0.308	0.349	2.16	4.19	0.630	0.031
KHAJ	0.21	0.44	2.35	5.83	0.08	0.12	0.31	0.73	0.06	0.01
NÄYTE NRO	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Ba	C
1	0.022	0.087	5.65	0.018	0.012	0.029	0.103	0.020	0.180	4.13
2	0.022	0.086	5.03	0.021	0.014	0.035	0.106	0.019	0.181	7.29
3	0.021	0.088	5.53	0.018	0.012	0.029	0.105	0.022	0.170	8.25
4	0.023	0.079	5.06	0.018	0.011	0.024	0.096	0.020	0.160	11.20
5	0.019	0.038	4.22	0.012	0.003	0.007	0.147	0.027	0.106	5.24
6	0.013	0.044	3.62	0.010	0.008	0.017	0.124	0.031	0.136	1.44
7	0.017	0.147	4.62	0.015	0.009	0.043	0.104	0.018	0.173	22.10
8	0.017	0.089	5.83	0.015	0.009	0.018	0.111	0.029	0.154	2.24
9	0.017	0.082	4.95	0.016	0.010	0.022	0.119	0.024	0.200	10.10
10	0.022	0.076	5.91	0.018	0.012	0.024	0.097	0.022	0.166	1.47
11	0.023	0.092	5.59	0.014	0.010	0.026	0.094	0.021	0.170	2.48
12	0.020	0.078	5.47	0.016	0.011	0.024	0.097	0.020	0.165	1.59
13	0.019	0.089	6.50	0.016	0.010	0.020	0.101	0.024	0.148	2.78
14	0.021	0.062	6.08	0.013	0.008	0.018	0.074	0.024	0.107	1.43
KA	0.020	0.081	5.38	0.016	0.010	0.024	0.106	0.023	0.158	5.84
KHAJ	0.003	0.02	0.74	0.003	0.003	0.01	0.02	0.004	0.03	5.56

Massa: SMA 20
 Sideaine: B-80
 Kivi: Teisko
 Lisäaineet: Kuitu Arbocel 0,4 %

Tiheydet koekappaleen
 ulkomittojen mukaan

Täytejauhe	Sideaine- pitoisuus	102 ICT				406 ICT			
		Tiheys (kg/m ³)		Leikkausvoima (kN/m ²)		Tiheys (kg/m ³)		Leikkausvoima (kN/m ²)	
		yks.	ka	yks.	ka	yks.	ka	yks.	ka
Kalkkikivijauhe	6,2	2158		81		2225		68	
	6,2	2180		71		2240		68	
	6,2	2184	2174	65	72	2257	2241	65	67
	6,5	2154		72		2227		59	
	6,5	2210		71		2286		64	
	6,5	2137	2167	74	72	2205	2239	61	61
	6,8	2178		79		2244		66	
	6,8	2136		56		2204		47	
	6,8	2145	2153	61	65	2198	2215	54	56
LT, 14	5,9	2181		86		2254		75	
	5,9	2140		76		2210		68	
	5,9	2149	2157	64	75	2211	2225	61	68
	6,2	2177		77		2238		82	
	6,2	2172		77		2243		68	
	6,2	2157	2169	72	75	2235	2239	68	73
	6,5	2143		79		2223		63	
	6,5	2217		73		2280		63	
	6,5	2200	2187	78	77	2263	2255	73	66
LT, 8	5,9	2132		72		2199		63	
	5,9	2128		82		2194		73	
	5,9	2150	2137	79	78	2217	2203	70	69
	6,2	2130		67		2206		56	
	6,2	2142		78		2202		60	
	6,2	2126	2133	82	76	2198	2202	76	64
	6,5	2150		78		2222		72	
	6,5	2151		79		2218		65	
	6,5	2132	2144	75	77	2219	2220	61	66
LT, 9	6,5	2108		75		2193		67	
	6,5	2140		76		2217		68	
	6,5	2094	2114	85	79	2171	2194	75	70
	6,8	2117		79		2194		73	
	6,8	2144		72		2223		68	
	6,8	2119	2127	77	76	2214	2210	83	75
	7,1	2138		76		2210		72	
	7,1	2166		88		2248		78	
	7,1	2142	2149	81	82	2225	2228	73	74

Massa: EA 20
 Sideaine: B-80
 Kivi: Teisko
 Lisäaineet: -

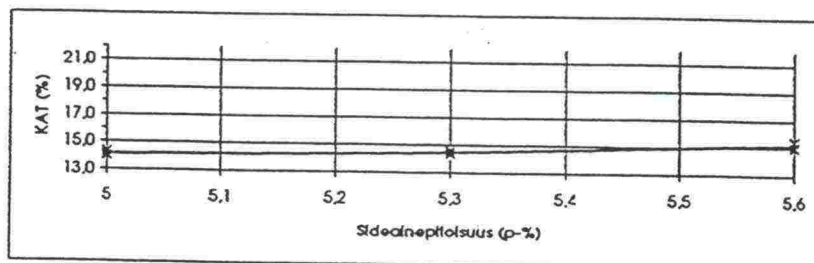
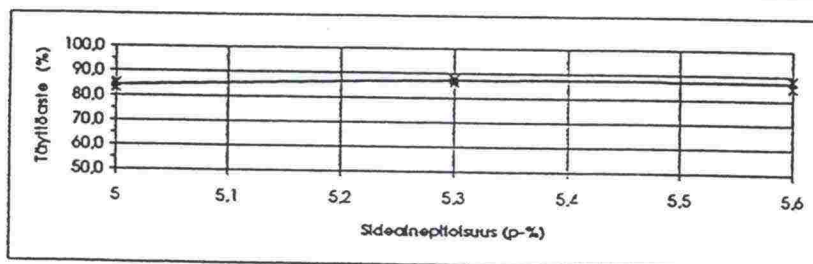
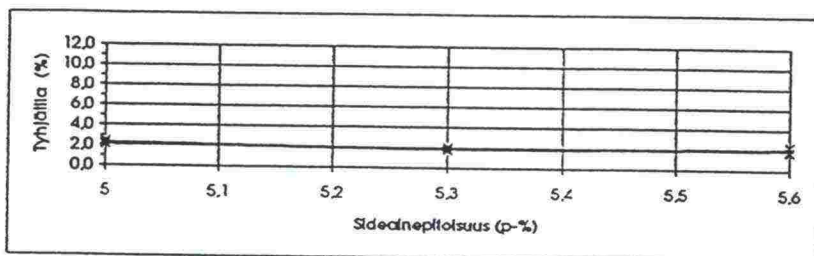
Tiheydet koekappaleen
 ulkomittojen mukaan

Täytejauhe	Sideaine- pitoisuus	102 ICT			
		Tiheys (kg/m³)		Leikkausvoima (kN/m²)	
		yks.	ka	yks.	ka
Kalkkikivijauhe	5	2385		83	
	5	2363		87	
	5	2388	2379	65	78
	5,3	2404		70	
	5,3	2418		83	
	5,3	2432	2418	52	68
	5,6	2434		41	
	5,6	2437		46	
	5,6	2418	2430	17	35
LT, 14	5	2409		66	
	5	2393	2401	63	65
	5,3	2396		24	
	5,3	2419		22	
	5,3	2413	2409	17	21
	5,6	2410		24	
	5,6	2393		17	
	5,6	2379	2394	5	15
LT, 4	5	2157		98	
	5	2120		78	
	5	2146	2141	93	90
	5,3	2163		78	
	5,3	2141		95	
	5,3	2162	2155	91	88
	5,6	2166		93	
	5,6	2184		87	
	5,6	2169	2173	93	91
	6,2	2199		82	
	6,2	2176		74	
	6,2	2208	2194	83	80
	6,5	2244		84	
LT, 8	5	2296		72	
	5	2257	2277	85	79
	5,3	2331		79	
	5,3	2347	2339	75	77
	5,6	2358		57	
	5,6	2384		55	
	5,6	2375	2372	35	49
	5,9	2378		48	
LT, 9	5,9	2391	2385	24	36
	5,9	2187		81	
	5,9	2189	2188	87	84
	6,2	2205		79	
	6,2	2216	2211	77	78
	6,5	2312		58	
	6,5	2252		71	
	6,5	2278	2281	52	60
	6,8	2278		50	
	6,8	2267	2273	66	58

EA 20 Kalkkifilleri

Massa:	EA20/ASTO	102 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	Kalkkifilleri	2720 kg/m ³
Lisäaineet:		%

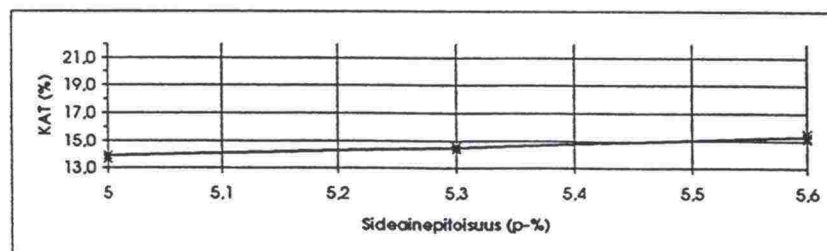
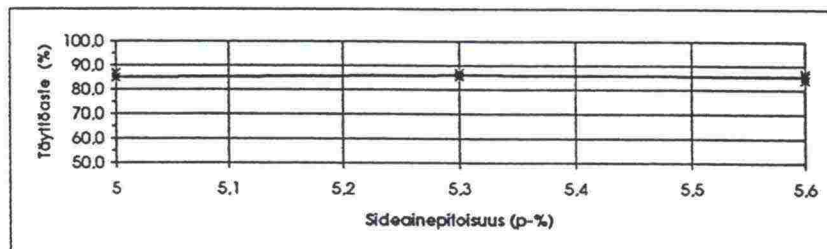
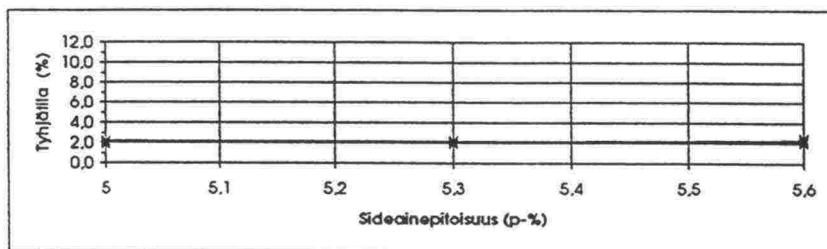
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvo		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	EA20/ASTO	5	12	2482	1962,5	1155,1	1962,5	2431	2,1	14,0	85,2			
2	EA20/ASTO	5	12	2482	1988	1169,6	1988	2429	2,1	14,0	84,8			
3	EA20/ASTO	5	12	2482	1983,9	1165	1983,9	2423	2,4	14,3	83,2			
4	EA20/ASTO	5,3	12	2471	1997	1172,2	1997	2421	2,0	14,6	86,2			
5	EA20/ASTO	5,3	12	2471	1975,2	1161,8	1975,2	2428	1,7	14,3	88,0			
6	EA20/ASTO	5,3	12	2471	1972,1	1159,3	1972,1	2426	1,8	14,4	87,5			
7	EA20/ASTO	5,6	12	2460	1965,8	1152,4	1965,8	2417	1,8	15,0	88,3			
8	EA20/ASTO	5,6	12	2460	1980,9	1160,4	1980,9	2414	1,9	15,1	87,7			
9	EA20/ASTO	5,6	12	2460	1960,2	1144,5	1960,2	2403	2,3	15,5	85,1	2,0	15,2	87,0



EA 20 LT 14

Massa:	EA20/ASTO	102 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT, 14	2480 kg/m ³
Lisäaineet:		%

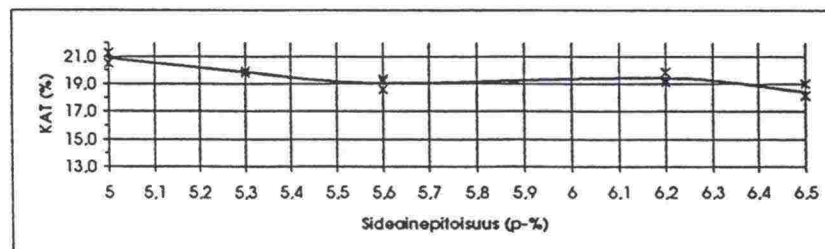
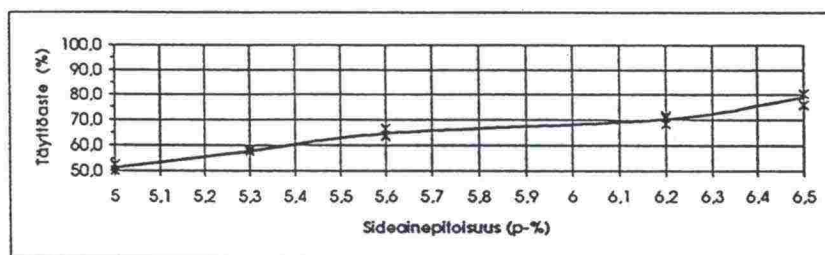
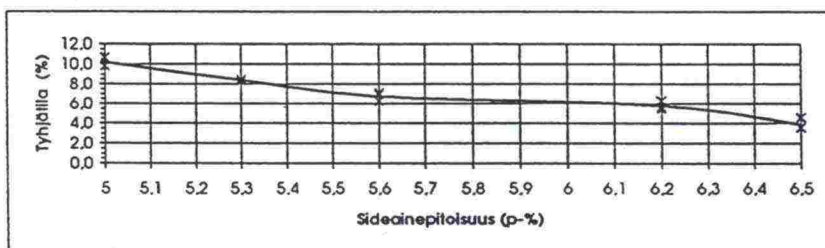
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	EA20/ASTO	5	12	2457	1980,5	1159,7	1980,5	2413	1,8	13,6	86,7			
2	EA20/ASTO	5	12	2457	1973,6	1153,5	1973,6	2407	2,1	13,9	85,1			
3	EA20/ASTO	5	12	2457	1962,7	1146,8	1962,7	2406	2,1	13,9	84,8	2,1	13,9	84,9
4	EA20/ASTO	5,3	12	2447	1989,5	1160,6	1989,5	2400	1,9	14,4	86,8			
5	EA20/ASTO	5,3	12	2447	1986,7	1157,5	1986,7	2396	2,1	14,5	85,7			
6	EA20/ASTO	5,3	12	2447	1998,1	1163,5	1998,1	2394	2,1	14,6	85,3	2,0	14,5	85,9
7	EA20/ASTO	5,6	12	2436	1981,2	1151	1981,2	2386	2,0	15,1	86,6			
8	EA20/ASTO	5,6	12	2436	1983	1150,4	1983	2382	2,2	15,3	85,5			
9	EA20/ASTO	5,6	12	2436	1995,1	1155,2	1995,1	2375	2,5	15,5	84,0	2,2	15,3	85,4



EA 20 LT 4

Massa:	EA20/ASTO	102 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT, 4	2190 kg/m ³
Lisäainet:		%

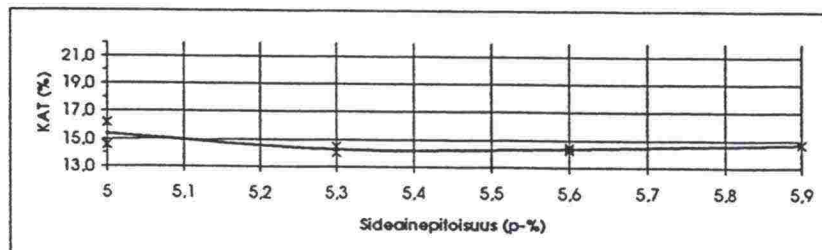
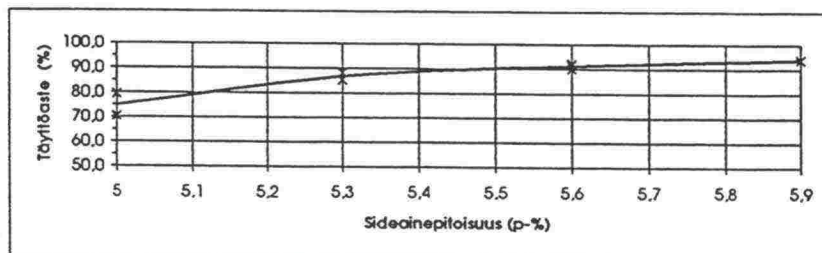
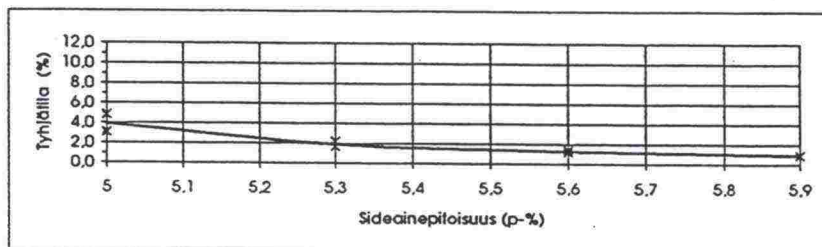
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	EA20/ASTO	5	12	2421	1835,1	987	1835,1	2164	10,6	21,2	49,9			
2	EA20/ASTO	5	12	2421	1957,1	1061,3	1957,1	2185	9,8	20,5	52,3	10,2	20,9	51,1
3	EA20/ASTO	5,3	12	2411	1898,3	1037,9	1898,3	2206	8,5	19,9	57,5			
4	EA20/ASTO	5,3	12	2411	1969,6	1078,9	1969,6	2211	8,3	19,8	58,1	8,4	19,9	57,8
5	EA20/ASTO	5,6	12	2400	1824,8	1014	1824,8	2251	6,2	18,6	66,4			
6	EA20/ASTO	5,6	12	2400	1961,8	1083,8	1961,8	2234	6,9	19,2	63,9			
7	EA20/ASTO	5,6	12	2400	1911,6	1054,4	1911,6	2230	7,1	19,3	63,3	6,8	19,0	64,6
8	EA20/ASTO	6,2	12	2380	1970,7	1092,9	1970,7	2245	5,7	19,3	70,7			
9	EA20/ASTO	6,2	12	2380	1892,9	1044	1892,9	2230	6,3	19,9	68,2			
10	EA20/ASTO	6,2	12	2380	1950,3	1084	1950,3	2251	5,4	19,1	71,7	5,8	19,4	70,2
11	EA20/ASTO	6,5	12	2370	1993,6	1112	1993,6	2261	4,6	19,0	75,9			
12	EA20/ASTO	6,5	12	2370	1994,2	1121,3	1994,2	2285	3,6	18,2	80,2			
13	EA20/ASTO	6,5	12	2370	2039	1146,8	2039	2285	3,6	18,1	80,3	3,9	18,4	78,8



EA 20 LT 8

Massa:	EA20/ASTO	102 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT. 8	2280 kg/m ³
Lisäainet:		%

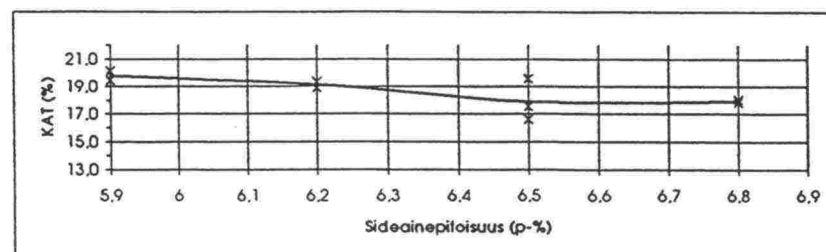
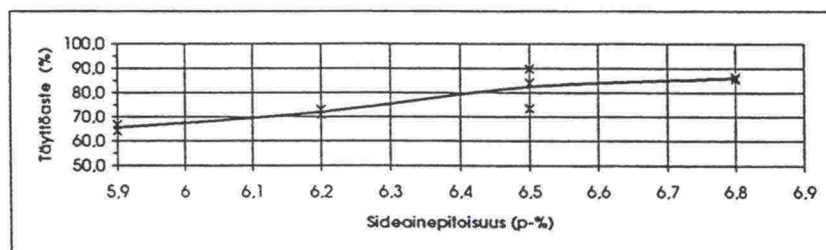
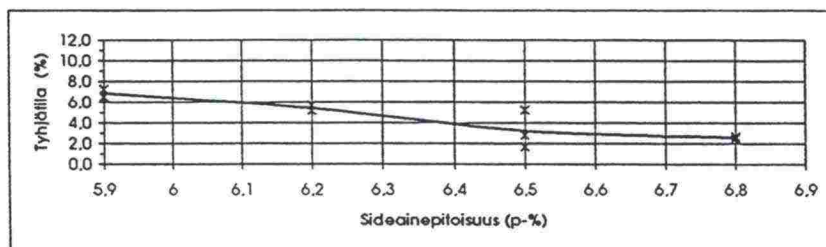
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	EA20/ASTO	5	12	2433	1942,5	1119,5	1942,5	2360	3,0	14,6	79,4			
2	EA20/ASTO	5	12	2433	1948,5	1107,3	1948,5	2316	4,8	16,2	70,3	3,9	15,4	74,8
3	EA20/ASTO	5,3	12	2423	1994,4	1153,1	1994,4	2371	2,2	14,5	85,1			
4	EA20/ASTO	5,3	12	2423	2000,7	1161	2000,7	2383	1,7	14,0	88,2	1,9	14,3	86,7
5	EA20/ASTO	5,6	12	2412	1982,3	1151,2	1982,3	2385	1,1	14,2	92,1			
6	EA20/ASTO	5,6	12	2412	1988,7	1152,2	1988,7	2377	1,4	14,5	90,0			
7	EA20/ASTO	5,6	12	2412	2021,6	1173	2021,6	2382	1,2	14,3	91,3	1,3	14,3	91,2
8	EA20/ASTO	5,9	12	2402	1969,8	1142	1969,8	2380	0,9	14,7	93,7			
9	EA20/ASTO	5,9	12	2402	1985,1	1150,9	1985,1	2380	0,9	14,7	93,7	0,9	14,7	93,7



EA 20 LT 9

Massa:	EA20/ASTO	102 kierrosta
Sidaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT. 9	2260 kg/m ³
Lisäaineet:		%

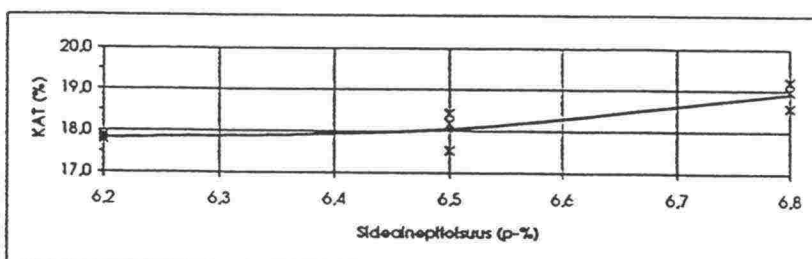
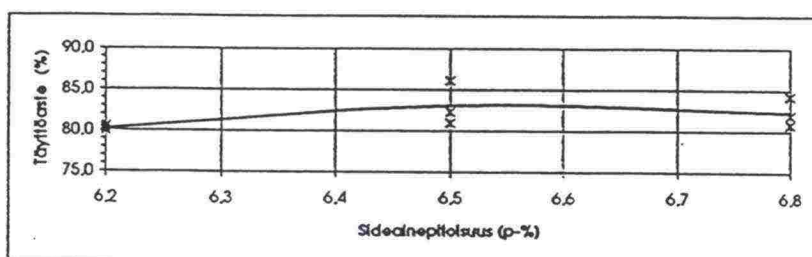
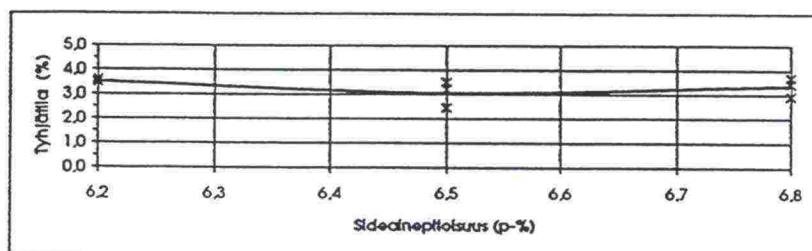
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
6	EA20/ASTO	5,9	12	2399	1950,7	1081,5	1950,7	2244	6,5	19,4	66,8			
7	EA20/ASTO	5,9	12	2399	1960,7	1079,7	1960,7	2226	7,2	20,1	64,0	6,9	19,8	65,4
4	EA20/ASTO	6,2	12	2389	1961,8	1091,5	1961,8	2254	5,6	19,3	70,8			
5	EA20/ASTO	6,2	12	2389	1981,6	1107,4	1981,6	2267	5,1	18,9	72,9	5,4	19,1	71,9
1	EA20/ASTO	6,5	12	2379	1999	1144,3	1999	2339	1,7	16,6	89,9			
2	EA20/ASTO	6,5	12	2379	1996,9	1111,4	1996,9	2255	5,2	19,6	73,4			
3	EA20/ASTO	6,5	12	2379	2006,2	1138,7	2006,2	2313	2,8	17,5	84,1	3,2	17,9	82,5
8	EA20/ASTO	6,8	12	2369	1999,2	1134,3	1999,2	2311	2,4	17,8	86,5			
9	EA20/ASTO	6,8	12	2369	1982,7	1123	1982,7	2306	2,6	18,0	85,4	2,5	17,9	85,9



SMA 20 Kalkkifilleri

Massa:	SMA 20	406 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	Kalkkifilleri	2720 kg/m ³
Lisäaineet:	Arbocel	0,4 %

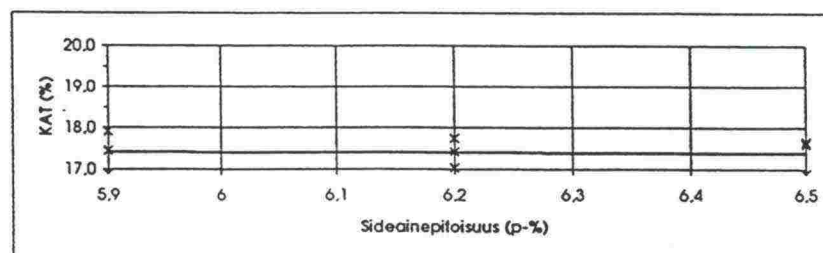
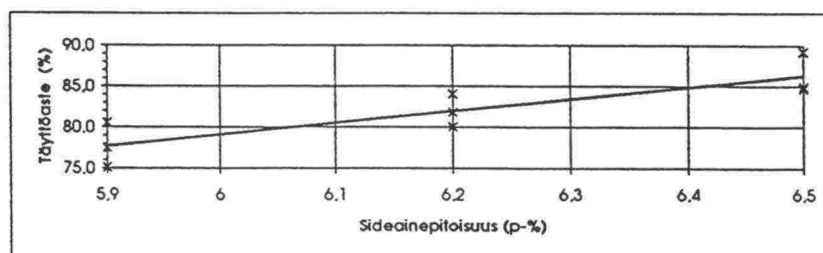
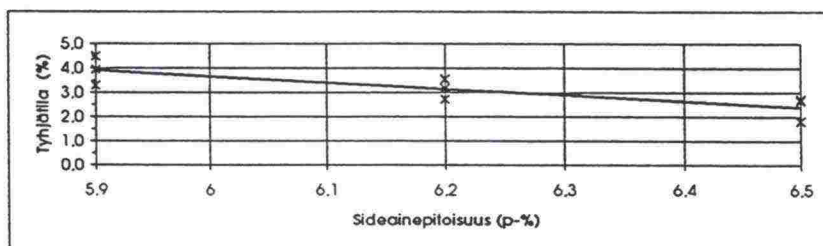
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tibeyn (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	SMA 20	6,2	9	2437	1959,9	1132	1965,4	2352	3,5	17,8	80,3			
2	SMA 20	6,2	9	2437	1974,9	1138,2	1978,7	2350	3,6	17,9	79,9			
3	SMA 20	6,2	9	2437	1956,4	1127,4	1959	2353	3,5	17,8	80,5	3,5	17,8	80,2
4	SMA 20	6,5	9	2426	1953	1124,8	1959	2341	3,5	18,4	81,0			
5	SMA 20	6,5	9	2426	1980,2	1146,1	1982,7	2367	2,4	17,5	86,0			
6	SMA 20	6,5	9	2426	1966,2	1134,8	1972,1	2348	3,2	18,2	82,3	3,1	18,0	83,1
7	SMA 20	6,8	9	2416	1983,9	1140,3	1986,4	2345	2,9	18,6	84,2			
8	SMA 20	6,8	9	2416	1977,6	1129,5	1979,5	2327	3,7	19,2	80,8			
9	SMA 20	6,8	9	2416	1966,2	1125,8	1968,6	2333	3,4	19,0	82,0	3,3	18,9	82,3



SMA 20 LT 14

Massa:	SMA 20	406 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT, 14	2480 kg/m ³
Lisäaineet:	Arbocel	0,4 %

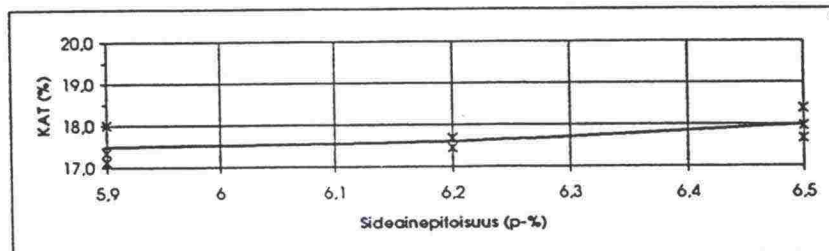
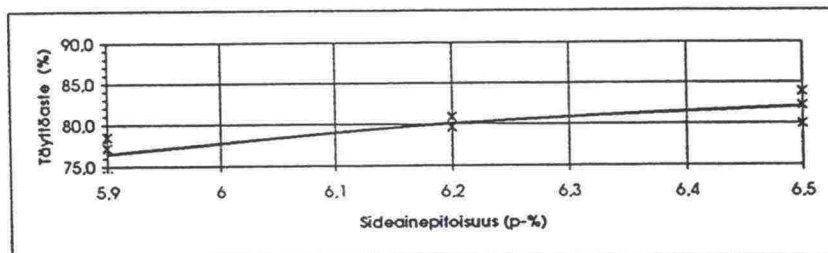
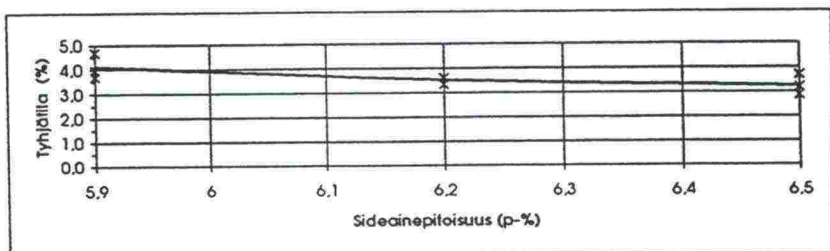
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT' (%)	KAT' (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	SMA 20	5,9	9	2430	1974,5	1136,8	1977	2350	3,3	16,9	80,5			
2	SMA 20	5,9	9	2430	1961,7	1120,8	1965,8	2322	4,5	17,9	75,0			
3	SMA 20	5,9	9	2430	1957	1121,3	1959,6	2334	3,9	17,4	77,4	3,9	17,4	77,7
4	SMA 20	6,2	9	2419	1976,8	1138,2	1978,1	2354	2,7	17,0	84,0			
5	SMA 20	6,2	9	2419	1971,6	1129	1973,9	2334	3,5	17,7	80,0			
6	SMA 20	6,2	9	2419	1965,5	1129,3	1968,3	2343	3,2	17,4	81,8	3,1	17,4	81,9
7	SMA 20	6,5	9	2409	1963,9	1127,6	1965,6	2344	2,7	17,6	84,6			
8	SMA 20	6,5	9	2409	1953,5	1128,4	1954,4	2365	1,8	16,9	89,2			
9	SMA 20	6,5	9	2409	1981,4	1137,5	1982,4	2345	2,6	17,6	85,0	2,4	17,4	86,3



SMA 20 LT 8

Massa:	SMA 20	406 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m ³
Kivi:	Teisko	2680 kg/m ³
Täytejauhe:	LT. 8	2280 kg/m ³
Lisäainet:	Arbocel	0,4 %

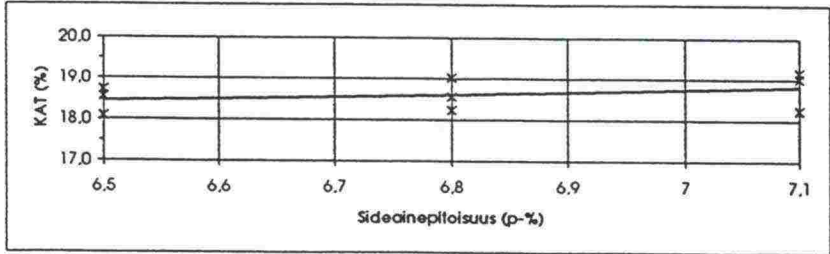
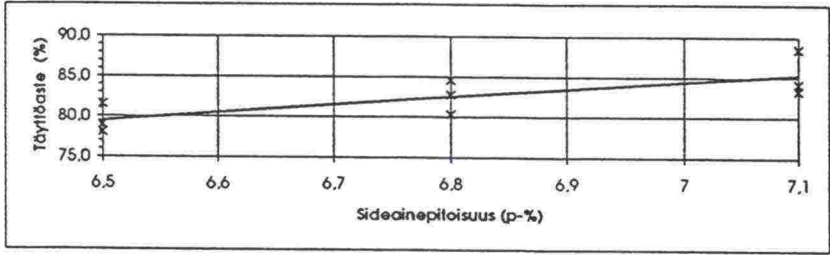
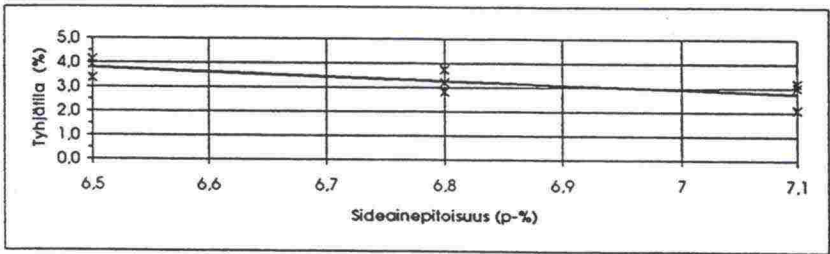
Nro	Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m ³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m ³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
												TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1	SMA 20	5,9	9	2413	1952,6	1115,3	1958	2317	4,0	17,4	77,2			
2	SMA 20	5,9	9	2413	1982,3	1126,7	1988,9	2299	4,7	18,0	73,9			
3	SMA 20	5,9	9	2413	1954,2	1120,1	1961,1	2324	3,7	17,1	78,5	4,1	17,5	76,5
4	SMA 20	6,2	9	2402	1981,4	1131,2	1987	2315	3,6	17,7	79,6			
5	SMA 20	6,2	9	2402	1975,3	1128,1	1978,8	2322	3,3	17,4	80,9			
6	SMA 20	6,2	9	2402	1974,8	1126,7	1979,5	2316	3,6	17,7	79,6	3,5	17,6	80,0
7	SMA 20	6,5	9	2392	1979,8	1130,3	1982,4	2323	2,9	17,7	83,8			
8	SMA 20	6,5	9	2392	1966,5	1121,3	1970,7	2315	3,2	18,0	82,2			
9	SMA 20	6,5	9	2392	1980,6	1126	1985,8	2304	3,7	18,4	79,9	3,2	18,0	82,0



SMA 20 LT 9

Massa:	SMA 20	406 kierrosta
Sideaine:	B-80	1020 kg/m3
Kivi:	Teisko	2680 kg/m3
Täytejauhe:	LT. 9	2260 kg/m3
Lisäaineet:	Arbocel	0,4 %

Nro Massa	SAP (%)	TJ-pit. (%)	Teor. tih. (kg/m³)	Ilma (g)	Vesi (g)	P-kuiva (g)	Tiheys (kg/m³)	TT (%)	KAT (%)	TA (%)	Keskiarvot		
											TT (%)	KAT (%)	TA (%)
1 SMA 20	6,5	9	2390	1969,1	1120,4	1977,9	2296	3,9	18,5	78,9			
2 SMA 20	6,5	9	2390	1975,6	1128,1	1983,4	2310	3,3	18,1	81,5			
3 SMA 20	6,5	9	2390	1972,9	1121,8	1982,8	2291	4,1	18,7	78,0	3,8	18,4	79,5
4 SMA 20	6,8	9	2380	1987,7	1126,6	1994,4	2291	3,7	19,0	80,3			
5 SMA 20	6,8	9	2380	1969,6	1120,1	1971,8	2313	2,8	18,2	84,6			
6 SMA 20	6,8	9	2380	1981,9	1127,4	1987,9	2303	3,2	18,6	82,7	3,3	18,6	82,5
7 SMA 20	7,1	9	2369	1975,3	1119,4	1980,6	2294	3,2	19,2	83,3			
8 SMA 20	7,1	9	2369	1964,7	1118,8	1965,8	2320	2,1	18,2	88,5			
9 SMA 20	7,1	9	2369	2006,8	1137,1	2010,4	2298	3,0	19,0	84,1	2,8	18,8	85,3



VEDENKESTOKOE / ILMASÄILYTYS

HIENO- AINES	NÄYTE NRO	HALKAISU- VETOLUJ. (kN/m ²)	HVL KA (kN/m ²)	HVL KHAJ	TARTTUVAUS- LUKU (%)
LENTOTUHKKA 14	2	2335.5			
	4	2463.2			
	5	2191.8			
	7	2680.9			
	10	2253.3			
	12	2326.4	2375.2	160.0	104.7
LENTOTUHKKA 8	14	2026.6			
	16	1972.9			
	17	2500.1			
	19	2264.5			
	22	2368.5			
	24	2133.8	2211.1	186.2	100.5
LENTOTUHKKA 9	26	2170.6			
	28	1911.5			
	29	2195.8			
	31	2461.0			
	34	2106.8			
	36	2230.2	2179.3	162.9	95.3
LT 14 50 % KALIMAAS. 50 %	38	2292.7			
	40	2424.4			
	41	2422.6			
	43	2553.6			
	46	2813.6			
	48	2436.9	2490.6	163.0	95.4
LT 8 50 % KALIMAAS. 50 %	50	2386.9			
	52	2022.9			
	53	2285.6			
	55	2210.8			
	58	2029.8			
	60	2111.3	2174.5	133.3	91.2
LT 9 50 % KALIMAAS. 50 %	62	2423.5			
	64	2089.3			
	65	2309.4			
	67	2364.2			
	70	2446.5			
	72	2423.9	2342.8	122.2	90.9
KALKKIK. 50 % KALIMAAS. 50 %	74	2333.7			
	76	2067.6			
	77	2296.3			
	79	2559.4			
	82	2011.2			
	84	2431.1	2283.2	192.0	75.1

KA = 2293.8

KA = 93.3

VEDENKESTOKOE / VESISÄILYTYS

HIENO- AINES	NÄYTE NRO	HALKAISU- VETOLUJ. (kN/m ²)	HVL KA (kN/m ²)	HVL KHAJ
LENTOTUHKA 14	1	2507.6	2486.3	164.6
	3	2425.0		
	6	2768.8		
	8	2332.3		
	9	2282.5		
	11	2601.7		
LENTOTUHKA 8	13	2138.9	2221.7	141.2
	15	2189.3		
	18	2445.0		
	20	2220.3		
	21	2000.8		
	23	2335.8		
LENTOTUHKA 9	25	2234.9	2077.6	192.5
	27	2221.4		
	30	2204.7		
	32	1747.6		
	33	1874.9		
	35	2181.9		
LT 14 50 % KALIMAAS. 50 %	37	2372.6	2376.8	214.5
	39	2385.8		
	42	2695.9		
	44	2545.6		
	45	2020.3		
	47	2240.7		
LT 8 50 % KALIMAAS. 50 %	49	2039.9	1982.3	134.4
	51	2182.7		
	54	1775.1		
	56	1920.9		
	57*	977.1		
	59	1993.0		
LT 9 50 % KALIMAAS. 50 %	61	2062.4	2129.1	181.7
	63	2150.1		
	66	2412.7		
	68	2198.0		
	69	1801.2		
	71	2150.4		
KALKKIK. 50 % KALIMAAS. 50 %	73	1645.1	1714.2	204.9
	75	1799.6		
	78	1985.3		
	80	1427.1		
	81*	257.0		
	83*	758.3		

KA = 2141.2

* = NÄYTE HYLÄTTY

HUOM: NÄYTTEET 81 JA 83 REIKÄISIÄ

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 42/1995 Visio tiivlistä moottorikadusta. TIEL 3200323
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 46/1995 Vuosien 1986-1992 henkilöliikennetutkimusten vertailu. TIEL 3200322
- 48/1995 Alueiden kehittäminen ja tiensuunnittelu. TIEL 3200325
- 49/1995 Väylien ja maankäytön suunnittelun vuorovaikutus. TIEL 3200326
- 50/1995 Liikenne- ja autokantaennuste 1995-2020. TIEL 3200327
- 51/1995 Liikenneturvallisuus yleisillä teillä v. 1989-93. TIEL 3200328
- 52/1995 Liikenteen seuranta ja häiriöiden havaitseminen. TIEL 3200329
- 53/1995 Niitto- ja vesakonraivaustöiden turvallisuus.
- 54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 55/1995 Alempiasteinen tieverkko ja kylien elinvoimaisuus. TIEL 3200331
- 56/1995 Yhteenveto tutkimusohjelman julkaisuista (Talvi ja tieliikenne -projekti) TIEL 3200332
- 57/1995 Yhteenveto tutkimusohjelman julkaisuista (Talvi ja tieliikenne -projekti), englanninkielinen. TIEL 3200332E
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - Ideakilpailu. TIEL 3200333
- 59/1995 Laatukriteerien määrittäminen laatuvaastuurakentamista varten. TIEL 3200334
- 60/1995 Tien rakenteellisten hidastimien vaikutus ajodynamiikkaan. TIEL 3200335
- 61/1995 Tie maaseudun mahdollisuuksiin. TIEL 3200336
- 62/1995 Soratien tasaisuustunnusluku. TIEL 3200337
- 63/1995 Riista-aitakokeilu valtatiellä 6. TIEL 3200339
- 64/1995 Pääväylät kaupunkialueella - Kaupunkikuvalliset lähtökohdat. TIEL 3200339
- 65/1995 Tiehankkeen suunnittelu- ja päätöksentekoprosessin analyysi: Valtatie 7 välillä Koskenkylä-Loviisa. TIEL 3200340
- 66/1995 Teknologian siirto; Bauma 1995 -messut. TIEL 3200341
- 67/1995 Teiden ja siltojen kaiteet; Tyyppipiirustuskaiteiden muotoitumahdollisuudet ulkonäön ja turvallisuuden kannalta, kaiteiden ja meluesteiden liittäminen penkereeltä sillalle. TIEL 3200343
- 68/1995 Mikkelin ohikulkutien vaikutusten jälkiseuranta. TIEL 3200344
- 69/1995 Asfalttimassan ominaisuuksien parantaminen lentotuhkalla. TIEL 3200345

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-140-3
TIEL 3200345